

Trabajo de Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

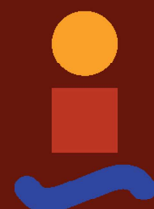
Análisis del Impacto de las Variaciones de Temperatura de los Conductores en la Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor: Fernando Pérez Ramírez

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

**Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Análisis del Impacto de las Variaciones de Temperatura de los Conductores en la Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor:

Fernando Pérez Ramírez

Tutor:

Antonio de la Villa Jaén

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Trabajo de Fin de Máster: Análisis del Impacto de las Variaciones de Temperatura de los Conductores en la
Estimación de Estado de Sistemas Eléctricos de Potencia

Autor: Fernando Pérez Ramírez

Tutor: Antonio de la Villa Jaén

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

A mis padres por su apoyo incondicional y esfuerzo en todo momento. Sin ellos no me habría sido posible estudiar en Sevilla ni alcanzar mis objetivos como estudiante de ingeniería.

Agradecer a mis amigos por su paciencia y aguante en los malos momentos. En especial a aquella persona que siempre ha tenido unas palabras bonitas de ánimo y apoyo cuando más lo necesitaba. Su constante interés y cariño han hecho que nunca me rinda en mí día a día.

Finalmente, a mi tutor del trabajo de fin de máster por su ayuda, dedicación y atención durante la realización del mismo.

Fernando Pérez Ramírez

Estudiante de Máster

Sevilla, 2018

Resumen

En el presente documento se recogen ensayos realizados en Matlab acerca de cómo afecta la temperatura del conductor a la estimación de estado en sistemas eléctricos de potencia. Para tal fin, se parte de un algoritmo que realiza la estimación de estado, basado en mínimos cuadrados, al cual se le añadirán otros algoritmos que permitan calcular la temperatura del conductor. En función a ésta, se varía el valor de las resistencias de las líneas para posteriormente obtener las medidas del sistema a la temperatura ambiente y del conductor correspondiente.

El algoritmo resultante permite realizar la estimación de estado en la situación en la que lo llevan a cabo las empresas de distribución de energía eléctrica actualmente: mediante un esquema de la red con los parámetros de resistencia de las líneas calculados a 20°C, y con las medidas de la red tal y como se encuentren en la situación de explotación correspondiente. Por ello se toman las medidas obtenidas para el sistema afectado por el efecto que la temperatura del conductor y ambiente.

Finalmente, se llevarán a cabo una serie de ensayos para determinar en qué casos la estimación de estado actual es más susceptible de discrepar, en cuanto a valores de los residuos normalizados se refiere, respecto a una estimación de estado que considera el efecto de la temperatura en las líneas eléctricas del sistema.

Objetivos

Con el presente trabajo de investigación se persigue:

- ❖ Crear un algoritmo que permita realizar la estimación de estado con las resistencias de la red evaluadas a 20°C y las medidas correspondientes para un sistema cuyas resistencias se evalúan a la temperatura a la que se encuentre cada conductor. Para ello habrá que:
 - Elaborar un modelo que permita calcular la temperatura de los conductores del sistema en función de la potencia calorífica generada y la evacuada por cada línea.
 - Crear un algoritmo que permita dividir las líneas de la red estudiada en un número determinado de segmentos, creándose para ello una serie nudos artificiales. Dichos nudos tendrán asociados un par de medidas virtuales: potencia activa y reactiva inyectadas nulas.
 - Dotar al algoritmo principal de flexibilidad para poder introducir manualmente la temperatura ambiente deseada en cada nudo (subestación) o de forma aleatoria dentro de un rango determinado.
 - Realizar un algoritmo que varíe el valor de las resistencias de las líneas según los valores obtenidos en el algoritmo de cálculo de temperatura del conductor.
 - Elaborar un algoritmo que permita unificar los segmentos en los que se dividieron las líneas, obteniendo una red con una topología idéntica a la red original, pero de valores de los parámetros resistivos acorde a la temperatura del conductor.
- ❖ Llevar a cabo una serie de verificaciones cualitativas que permitan determinar que el algoritmo funciona correctamente y que los valores obtenidos son correctos.
- ❖ Realizar un estudio cualitativo que, empleando el algoritmo anterior, evalúe el efecto de no considerar la temperatura del conductor en la estimación de estado y qué factores pueden afectar en mayor medida a una diferencia significativa en la obtención del estado estimado del sistema.

La finalidad del trabajo es analizar una situación lo más realista de posible de la estimación de estado que llevan a cabo las empresas de distribución de energía eléctrica, empleando un esquema de la red con valores de las resistencias a 20°C, con respecto a una situación lo más próxima posible a lo que ocurre realmente. Es decir, las medidas tomadas por los elementos de medición considerando que los conductores, y en última instancia, las resistencias de las líneas, se encuentran a la temperatura correspondiente del conductor.

El alcance del trabajo se limita a la elaboración de un algoritmo que permita evaluar el efecto de no considerar la temperatura del conductor en la estimación de estado. Además de investigar qué factores dan lugar a una diferencia significativa con respecto a la estimación de estado que sí tuviera en cuenta dichas temperaturas.

Se supondrá en todo momento que se dispone de medidas de flujo de potencia activa y reactiva en ambos extremos de las líneas, quedando fuera del alcance evaluar cómo afectaría disponer de un menor número de medidas.

En este proyecto se considera que sólo las resistencias de las líneas se ven afectadas por una variación de la temperatura. Las reactancias y susceptancias, que se ven influenciadas de forma menos significativa, se considerarán constantes durante todo el estudio.

Queda fuera del alcance del proyecto analizar el efecto de la temperatura en la estimación de estado para temperaturas ambientes por debajo de 0°C.

El análisis de los factores que afectan a una mayor discrepancia en la estimación de estado no afectada por la temperatura, con respecto a la estimación de estado que sí la tiene en consideración, se llevará a cabo de forma cuantitativa. Por tanto, un análisis cualitativo está fuera del alcance.

Dado el carácter práctico del trabajo, todas las redes analizadas son reales, con un estado de carga real, dejando fuera de análisis aquellas redes de carácter didáctico que no reflejen la realidad de los sistemas eléctricos debido a la complejidad de los mismos.

Se encuentra fuera del alcance del proyecto optimizar el algoritmo para que emplee el menor tiempo posible en llevar a cabo la estimación de estado, ya que las redes a analizar no son de gran dimensión. Sin embargo, sí se contempla realizar una alternativa al algoritmo de segmentación que permita obtener resultados similares a la estimación de estado que considera la temperatura de los conductores, sin necesidad de tener que emplear el análisis del estado de la red original segmentada. El análisis de segmentación, al disponer de un mayor número de nudos, ramas y medidas, empleará un tiempo de ejecución mucho mayor.

En cuanto al cálculo de la temperatura del conductor se refiere, se supondrán constantes una serie de parámetros meteorológicos, como la velocidad del viento, la emisividad, la radiación solar, entre otros. Por lo que queda fuera del alcance un análisis de la temperatura del conductor en función de estos parámetros.

Para la obtención de la temperatura de aquellas ramas que sean transformadores, no tiene sentido emplear el modelo de cálculo de temperatura de conductor aplicado a las líneas. Por tanto, se empleará un modelo cuadrático en función de la potencia a la que se encuentre el transformador con respecto a la nominal. Queda fuera del alcance del proyecto la realización de un modelo de cálculo de temperatura más exhaustivo para los transformadores.

Agradecimientos	vii
Resumen	viii
Objetivos	ix
Alcance	x
Índice	xi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Ilustraciones	xvi
Notación	xix
1 Estado del Arte	20
2 Análisis Previo	22
2.1. <i>Red IEEE14</i>	23
2.2. <i>Red IEEE24</i>	27
2.3. <i>Red Kundur</i>	31
2.4. <i>Conclusiones</i>	35
3 Modelo de Estimación de Estado con Segmentación de los Conductores	36
3.1. <i>Segmentación de una Línea</i>	36
3.2. <i>Segmentación de una Red</i>	39
3.3. <i>Modelo de Cálculo de la Temperatura del Conductor</i>	41
3.3.1. <i>Potencia Generada por Efecto Joule en el Conductor</i>	42
3.3.2. <i>Potencia Generada por Efecto del Campo Magnético en el Conductor</i>	42
3.3.3. <i>Potencia Generada por Efecto de la Radiación Solar sobre el Conductor</i>	43
3.3.4. <i>Potencia Generada por Efecto Corona</i>	44
3.3.5. <i>Evacuación de Calor por Convección</i>	44
3.3.6. <i>Evacuación de Calor por Radiación</i>	48
3.3.7. <i>Evacuación de Calor por Evaporación</i>	48
3.3.8. <i>Cálculo de la temperatura de equilibrio en el conductor</i>	48
3.3.9. <i>Simplificación del Modelo</i>	49
3.3.10. <i>Filtrado de la Solución</i>	51
3.3.11. <i>Cálculo de las temperaturas de líneas que sean transformadores</i>	52
3.4. <i>Justificación del Modelo</i>	53
3.5. <i>Justificación del Número de Divisiones de las Líneas en el Modelo de Segmentación</i>	57
4 Algoritmo	62
4.1. <i>Función 'Dividir_red'</i>	64
4.2. <i>Función 'Ampliar_medidas_RC'</i>	67
4.3. <i>Función 'Calc_temp_cond'</i>	68
4.3.1. <i>Pasos de la función</i>	68
4.3.2. <i>¿Es necesario un proceso iterativo para el cálculo de las temperaturas de los conductores?</i>	69
4.4. <i>Función 'R_Tcond'</i>	70
4.5. <i>Función 'Unir_segmentos_red'</i>	71
4.6. <i>Función 'Seleccion_medidas'</i>	73

4.7.	<i>Función 'Calc_temp_ambiente'</i>	74
5	Validación del Modelo y Algoritmo	76
5.1.	<i>Particularidades del Modelo 3</i>	77
5.2.	<i>Diferencias topológicas entre la red original y red unificada</i>	78
5.2.1	Red con/sin Elementos Shunt	79
5.2.2	Aumento del número de divisiones	81
5.2.3	Valor de la susceptancia	83
6	Ensayos	84
6.1.	<i>Efecto de la Temperatura Ambiente</i>	84
6.1.1	Red IEEE14	85
6.1.2	Red IEEE24	87
6.1.3	Red Kundur_v2	91
6.2.	<i>Efecto del Flujo PQ</i>	93
6.2.1	Red 115 kV	93
6.2.2	Red 400 kV	95
6.2.3	Red IEEE30	96
6.3.	<i>Efecto de la Resistencia según la Temperatura del conductor</i>	99
6.3.1	Red IEEE14	100
6.3.2	Red IEEE24	101
6.3.3	Red Kundur	102
6.4.	<i>Efecto de la Resistencia según la Temperatura Ambiente</i>	104
6.4.1	Red IEEE14_v1	104
6.4.2	Red IEEE24_v2	108
6.4.3	Red Kundur_v2	110
6.5.	<i>Efecto del Flujo PQ y Temperatura Ambiente</i>	111
6.5.1	Red 115 kV	111
6.5.2	Red 400 kV	113
6.5.3	Red IEEE30	115
7	Conclusiones de los Ensayos con Temperaturas Ambiente Constantes	118
8	Aplicación con Diferencias en la Temperatura Ambiente de Subestaciones	119
8.1.	<i>Temperatura Ambiente Aleatoria</i>	122
8.1.1	Temperaturas Frías	123
8.1.2	Temperaturas Suaves	126
8.1.3	Temperaturas Cálidas	128
8.1.4	Comparación de los Residuos Normalizados	131
8.2.	<i>Temperatura Ambiente Escalonada</i>	133
8.2.1	Área 1 con Temperaturas Cálidas	134
8.2.2	Área 3 con Temperaturas Suaves	137
8.2.3	Área 2 con Temperaturas Frías	140
9	Modelo Simplificado	143
9.1.	<i>Red IEEE14 con Temperaturas Suaves</i>	144
9.2.	<i>Red IEEE24 con Temperaturas Frías</i>	148
9.3.	<i>Red IEEE30 con Temperaturas Cálidas</i>	153
9.4.	<i>Red de 115 kV con Temperaturas Suaves</i>	155
9.5.	<i>Red de 400 kV con Temperaturas Cálidas</i>	156
10	Conclusiones sobre el Modelo Simplificado	159
11	Conclusiones Finales y Futuras Líneas de Investigación	160
	Bibliografía	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE14.	23
Tabla 2: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE14.	24
Tabla 3: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE14.	25
Tabla 4: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE14.	26
Tabla 5: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE24.	27
Tabla 6: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE24.	28
Tabla 7: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE24.	29
Tabla 8: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE24.	29
Tabla 9: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red Kundur.	31
Tabla 10: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red Kundur.	32
Tabla 11: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red Kundur.	33
Tabla 12: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red Kundur.	34
Tabla 13: Parámetros del número de Nusselt según el ángulo de incidencia del viento.	46
Tabla 14: Propiedades del aire según distinta altitud.	47
Tabla 15: Parámetros del Nusselt para un ángulo de incidencia del viento de 90° según el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie.	48
Tabla 16: Diámetro exterior según el nivel de tensión.	50
Tabla 17: Parámetros del modelo de temperatura de los transformadores según el nivel de tensión.	53
Tabla 18: Flujos de potencia activa y reactiva de la línea 1-2 segmentada para $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m.	56
Tabla 19: Flujos de potencia activa y reactiva de la línea 1-2 segmentada para $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m.	57
Tabla 20: Comparación de RN según el número de segmentos y nivel de carga.	58
Tabla 21: Diferencia de RN entre modelos según el número de segmentos empleados.	59
Tabla 22: Temperatura de los conductores según el número de divisiones y nivel de carga.	60
Tabla 23: Valores de la resistencia de la línea tras unificar segmentos según el nivel de carga y número de segmentos empleados en el modelo.	61
Tabla 24: Diferencias de resistencias unificadas según nivel de carga y número de divisiones de modelo empleado.	61
Tabla 25: Temperaturas de los conductores de la red IEEE4 en las iteraciones 2 y 3.	70
Tabla 26: Tabla de rango de temperaturas según la estación del año.	74
Tabla 27: Comparación de los RN en una red sin elementos capacitivos en paralelos y con ellos, según el número de divisiones.	80

Tabla 28: RN de la red IEEE24 con elementos capacitivos en paralelos según el número de divisiones.	81
Tabla 29: RN de la red Kundur con elementos capacitivos en paralelos según el número de divisiones.	82
Tabla 30: Comparación de los RN según el tamaño de la susceptancia en paralelo en la red IEEE24.	83
Tabla 31: RN según la temperatura ambiente de la red IEEE14.	85
Tabla 32: RN según la temperatura ambiente de la red IEEE24.	88
Tabla 33: RN según la temperatura ambiente de la red Kundur_v2.	91
Tabla 34: Diferencia de RN red 115 kV cargada y descargada.	94
Tabla 35: Diferencia de RN red 400 kV cargada y descargada.	95
Tabla 36: Diferencia de RN red IEEE30 cargada y descargada.	97
Tabla 37: RN de la red IEEE14 según la temperatura del conductor y valor de resistencia.	100
Tabla 38: RN de la red IEEE24 según la temperatura del conductor y valor de resistencia.	101
Tabla 39: RN de la red Kundur según la temperatura del conductor y valor de resistencia.	103
Tabla 40: RN de la red IEEE14_v1 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.	105
Tabla 41: RN de la red IEEE24_v2 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.	109
Tabla 42: RN de la red Kundur_v2 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.	110
Tabla 43: Comparación de RN de la red de 115 kV cargada y descargada según la temperatura ambiente.	111
Tabla 44: Comparación de RN de la red de 400 kV cargada y descargada según la temperatura ambiente.	114
Tabla 40: Comparación de RN de la red IEEE30 cargada y descargada según la temperatura ambiente.	116
Tabla 46: Temperaturas ambiente frías de la red australiana de 14 generadores simplificada.	123
Tabla 47: Temperaturas ambiente suaves de la red australiana de 14 generadores simplificada.	126
Tabla 48: Temperaturas ambiente cálidas de la red australiana de 14 generadores simplificada.	129
Tabla 49: RN del área 1 (A1) según temperaturas ambiente.	132
Tabla 50: RN del área 2 (A2) según temperaturas ambiente.	132
Tabla 51: RN del área 3 (A3) según temperaturas ambiente.	133
Tabla 52: RN área 1 (A1).	134
Tabla 48: RN área 3 (A3).	137
Tabla 54: RN área 2 (A2).	140
Tabla 50: Temperaturas ambiente de la red IEEE14.	144
Tabla 56: RN de la red IEEE14 comparando los tres modelos.	145
Tabla 57: Comparación de resistencias de la red IEEE14 aplicando el modelo exacto y simplificado.	148
Tabla 58: Temperaturas ambiente de la red IEEE24.	149
Tabla 59: RN de la red IEEE24 comparando los tres modelos.	149
Tabla 60: Comparación de resistencias de la red IEEE24 aplicando el modelo exacto y simplificado.	152
Tabla 61: Temperaturas ambiente de la red IEEE30.	153

Tabla 62: RN de la red IEEE30 comparando los tres modelos.	154
Tabla 64: Temperaturas ambiente de la red de 115 kV.	155
Tabla 65: RN de la red de 115 kV comparando los tres modelos.	155
Tabla 65: Temperaturas ambiente de la red de 400 kV.	156
Tabla 66: RN de la red de 400 kV comparando los tres modelos.	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Entradas y salidas de un estimador de estado.	20
Ilustración 2: Red IEEE14.	23
Ilustración 3: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE14.	24
Ilustración 4: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE14.	24
Ilustración 5: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE14.	25
Ilustración 6: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE14.	26
Ilustración 7: Red IEEE24.	27
Ilustración 8: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE24.	28
Ilustración 9: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE24.	28
Ilustración 10: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE24.	29
Ilustración 11: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE24.	30
Ilustración 12: Red Kundur.	31
Ilustración 13: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red Kundur.	31
Ilustración 14: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red Kundur.	32
Ilustración 15: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red Kundur.	33
Ilustración 16: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red Kundur.	34
Ilustración 17: Gráfica de residuos normalizados según la temperatura del conductor.	35
Ilustración 18: Línea 1-2.	37
Ilustración 19: Línea 1-2 y temperatura ambiente.	37
Ilustración 20: Línea 1-2 y temperaturas ambiente tras segmentación.	37
Ilustración 21: Distribución de temperaturas según las divisiones del conductor.	38
Ilustración 22: Introducción de medidas virtuales.	39
Ilustración 23: Red de 6 nudos y 6 ramas.	40
Ilustración 24: Red de 6 nudos y 6 ramas segmentada.	40
Ilustración 25: Mapa de radiación solar en España en el mes de Junio.	44
Ilustración 26: Mapa de nivel de viento en España en el mes de Junio.	45
Ilustración 27: Modelo de temperatura de los transformadores.	53
Ilustración 28: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente variable.	54
Ilustración 29: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente de 20°C.	55
Ilustración 30: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente de 40°C.	56
Ilustración 31: Diagrama de bloques y funciones del algoritmo de segmentación y cálculo de temperatura de conductores y medidas.	62

Ilustración 32: Identificación de medidas.	63
Ilustración 33: Ejemplo de matriz de ramas de una red segmentada.	66
Ilustración 34: Ejemplo de matriz de ampliación de temperaturas ambiente para cada rama.	66
Ilustración 35: Ejemplo de introducción de medidas virtuales en los nudos ficticios.	67
Ilustración 36: Segmentación de una resistencia.	72
Ilustración 37: Modificación de los valores de cada resistencia con la temperatura del conductor.	72
Ilustración 38: Resistencia de la línea ya modificada.	72
Ilustración 39: Modelos a ejecutar con el algoritmo.	76
Ilustración 40: Modelo en pi de una línea.	78
Ilustración 41: Modelo en pi de una línea multi-segmentada.	78
Ilustración 42: Red de 6 nudos y 6 ramas.	79
Ilustración 43: Red Kundur v2.	84
Ilustración 44: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE14 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.	86
Ilustración 45: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE14 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.	87
Ilustración 46: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE24 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.	89
Ilustración 47: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE24 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.	90
Ilustración 48: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red Kundur_v2 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.	92
Ilustración 49: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red Kundur_v2 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.	92
Ilustración 50: Red 115 kV.	93
Ilustración 51: Diferencia de temperatura en red 115 kV cargada y descargada.	94
Ilustración 52: Red 400 kV.	95
Ilustración 53: Diferencia de temperatura en red 400 kV cargada y descargada.	96
Ilustración 54: Red IEEE30.	97
Ilustración 55: Diferencia de temperatura en red IEEE30 cargada y descargada.	98
Ilustración 56: Red IEEE14_v1.	105
Ilustración 57: Temperaturas de la red IEEE14_v1 para valores de resistencias grandes y temperatura ambiente de 0 y 15°C.	107
Ilustración 58: Red IEEE24_v2	108
Ilustración 59: Temperaturas de los conductores de la red de 115 kV descargada.	113
Ilustración 60: Temperaturas de los conductores de la red de 400 kV cargada y descargada con una temperatura ambiente de 30°C.	115
Ilustración 61: Red australiana de 14 generadores simplificada.	120
Ilustración 62: Red australiana de 14 generadores simplificada A1.	121
Ilustración 63: Red australiana de 14 generadores simplificada A2.	121
Ilustración 64: Red australiana de 14 generadores simplificada A3.	122

Ilustración 65: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).	124
Ilustración 66: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).	125
Ilustración 67: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).	127
Ilustración 68: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).	128
Ilustración 69: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).	130
Ilustración 70: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).	131
Ilustración 71: Temperaturas ambiente cálidas área 1 (A1).	134
Ilustración 72: Temperaturas de los conductores área 1 (A1).	135
Ilustración 73: Número de medidas y residuos normalizados A1.	136
Ilustración 74: Temperaturas ambiente cálidas área 3 (A3).	137
Ilustración 75: Temperaturas de los conductores área 3 (A3).	138
Ilustración 76: Número de medidas y residuos normalizados A3.	139
Ilustración 77: Temperaturas ambiente cálidas área 2 (A2).	140
Ilustración 78: Temperaturas de los conductores área 2 (A2).	141
Ilustración 79: Número de medidas y residuos normalizados A2.	142
Ilustración 80: Diagrama de bloques y funciones del modelo simplificado.	143
Ilustración 81: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE14.	146
Ilustración 82: Temperaturas de los conductores de la red IEEE14 segmentada del modelo convencional y las del modelo simplificado.	147
Ilustración 83: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE24.	150
Ilustración 84: Temperaturas de los conductores de la red IEEE24 segmentada del modelo convencional y las del modelo simplificado.	151
Ilustración 85: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE30.	154
Ilustración 86: Medidas y residuos normalizados de la red de 115 kV.	156
Ilustración 87: Medidas y residuos normalizados de la red de 400 kV.	158

kV	Kilovoltio
P_i	Potencia activa inyectada o consumida en el nudo i
Q_i	Potencia reactiva inyectada o consumida en el nudo i
P_{ij}	Flujo de potencia activa entre los nudos i y j
Q_{ij}	Flujo de potencia reactiva entre los nudos i y j
RN	Residuos normalizados
V_i	Tensión del nudo i
Θ_i	Fase del nudo i
T_{cond}	Temperatura del conductor
T_{amb}	Temperatura ambiente
MW	Megavatio
Mvar	Megavar
MVA	Mega Voltio Amperio
R	Resistencia de una línea
R_i	Resistencia del segmento i
X	Reactancia de una línea
X_i	Reactancia del segmento i
B	Susceptancia de una línea
B_i	Susceptancia del segmento i
Ohm	Ohmios
Km	Kilometro
m	Metro
mm	Milímetro
W/m^2	Vatio por metro cuadrado
K	Kelvin
°C	Grados centígrados
m/s	Metros por segundo
Nv	Nivel de tensión
S	Potencia aparente
Div	Divisiones
ΔR_i	Incremento de la resistencia de un segmento i
\leq	Menor o igual
\geq	Mayor o igual

1 ESTADO DEL ARTE

El estimador de estado es una herramienta utilizada por los centros de control de energía eléctrica para una construcción, en tiempo real, del modelo eléctrico del sistema a partir de la redundancia de medidas. Esto permite determinar un estado de operación con mayor precisión que los que se obtienen a partir de las medidas proporcionadas por los instrumentos destinados para tal fin. La importancia dada a la estimación del estado de los sistemas eléctricos ha creado la necesidad de nuevas metodologías de análisis que mejoren la confiabilidad y precisión.

La estimación de estado realiza un análisis matemático del sistema basándose en datos recolectados por medidores e información sobre los parámetros de los modelos de los componentes de la red. Esta recolección de información implica el análisis de mediciones muy grandes en la corriente y tensión, modelado de redes externas y detección errores en las mediciones de los parámetros que describen el estado de la red, estos últimos se conocen con el nombre de errores grandes en los cuales, una función debe detectar las mediciones erróneas y eliminarlas o sustituirlas. Generalmente estos errores son causados por pérdida de comunicación con medidores o introducción de ruido en la medida, por mala calibración o por defectos en los equipos.

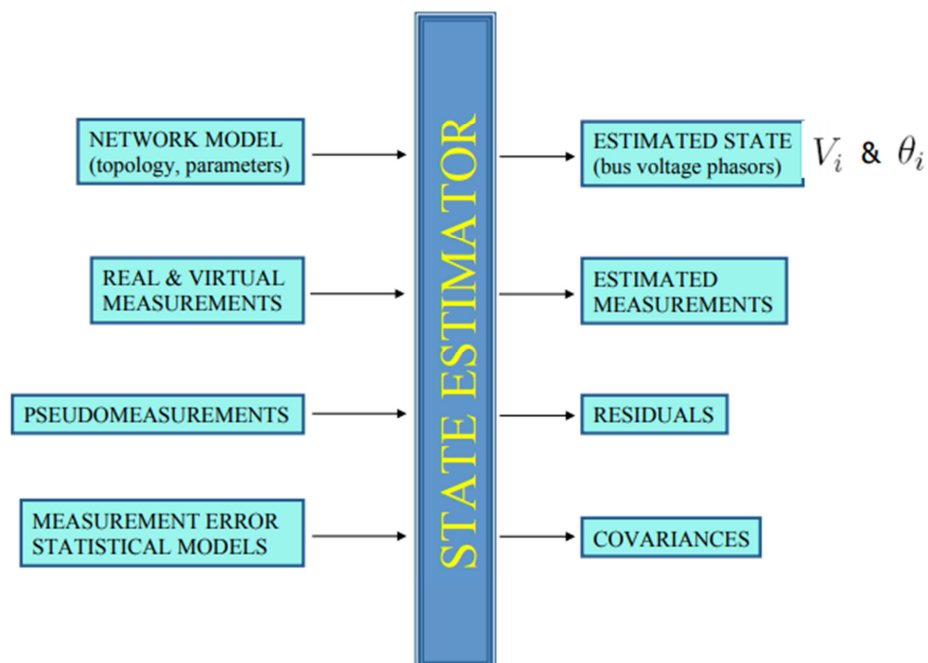


Ilustración 1: Entradas y salidas de un estimador de estado.

Como entradas del estimador de estado se requieren:

- Un modelo de la topología de la red que incluya parámetros y longitudes de las líneas. En este esquema de la red a analizar el valor de la resistencia se toma a 20°C.
- Un conjunto de medidas proporcionadas por los elementos de medición instalados en el sistema

(medidas reales) y medidas de valor nulo (medidas virtuales), como pueden ser inyecciones de potencia activa y reactiva en un nodo de transición.

- Un conjunto de medidas de carácter histórico, que se introducen por falta de las primeras (pseudomedidas).
- Un modelo estadístico de la distribución de los errores de las medidas.

Tras aplicar el algoritmo de estimación de estado se obtiene:

- El estado estimado, es decir, V y Θ de cada nodo.
- Medidas estimadas para el estado correspondiente.
- Residuos de las medidas: diferencia entre las medidas reales y medidas estimadas.
- La covarianza de las medidas o la desviación típica.

Las medidas reales, que son tomadas por los elementos medidores instalados en las líneas y enviadas a los centros de control correspondientes, miden en qué estado se encuentra la línea en unas condiciones ambiente y de carga determinadas. Es decir, tanto las condiciones meteorológicas como el estado de explotación de la red determinarán una temperatura determinada para cada conductor del sistema.

Como consecuencia de esta variación de la temperatura de las líneas, el valor que debería tomar la resistencia de cada línea será en función de dicha temperatura, a diferencia de los 20°C considerados en el modelo de la red en la estimación de estado.

Este aspecto podría dar lugar a que algunas medidas, consideradas exactas, tengan asociado un cierto error al no ser tomadas con una situación 'real' tal que haga que todos los conductores se encuentren a una temperatura de operación de 20°C.

Con este trabajo se pretende analizar el efecto que tiene no considerar la temperatura del conductor en la estimación de estado con respecto a la misma estimación si se considerara la resistencia de la línea evaluada a la temperatura del conductor.

2 ANÁLISIS PREVIO

En este apartado se pretende comprobar cómo afecta a los residuos normalizados (RN) obtenidos en la estimación de estado, una variación de la temperatura del conductor diferente a 20°C. Para poder analizar con mayor criterio el efecto de la temperatura, se considera que las medidas disponibles son exactas, sin incorporar ruido de medida. Las medidas no están afectadas por la temperatura, dado que son las que envían los elementos de medición en el estado de temperatura y carga de la red.

Cabe mencionar que la forma en la que se obtienen las medidas exactas es a partir de un reparto de cargas, para el cual se requiere el modelo topológico de la red y un conjunto de inyecciones de potencia activa y reactiva en los nudos del sistema, además de una tensión y una fase en el nudo de referencia (Slack). Si la red se encuentra con los parámetros resistivos a 20°C, estas medidas se obtendrán para una red cuyas líneas se encuentran a dicha temperatura. De igual forma se obtendrían las medidas para distintas temperaturas de los conductores.

Para dicho análisis se tomarán tres redes reales: IEEE14, IEEE24 y Kundur [2]. En las cuales se analizarán los RN obtenidos de la estimación de estado cuando la temperatura de todos los conductores es igual a 20, 50, 70 y 90°C. Es decir, se modifica el valor de las resistencias según la siguiente *ecuación 1*, se obtienen las medidas con la red en dichas condiciones (temperaturas de los conductores a 20, 50, 70 y 90°C) mediante un reparto de cargas y se realiza la estimación de estado con el modelo topológico de la red a 20°C y cada uno de los conjuntos de medidas obtenidos.

Nota: Estas medidas obtenidas del reparto de carga (en unas condiciones determinadas de temperatura de la red) son las medidas que se obtendrían de los instrumentos de medidas.

$$R'_{cc\theta} = R'_{cc} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] \quad (1)$$

siendo:

$R'_{cc\theta}$: la resistencia del conductor en corriente continua en Ω/m a la temperatura final θ .

R'_{cc} : la resistencia del conductor en corriente continua en Ω/m a la temperatura inicial $\theta_{R'_{cc}}$.

α : la variación de la resistencia con la temperatura en K^{-1} . Se consideran conductores de aluminio y por tanto un valor de $\alpha = 4.07 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

θ : la temperatura media del conductor en K.

$\theta_{R'_{cc}}$: la temperatura a la que se encuentra la resistencia en K. En este caso, 20°C.

Una vez modificado el valor de todas las resistencias de las líneas, se lleva a cabo la estimación de estado.

2.1. Red IEEE14

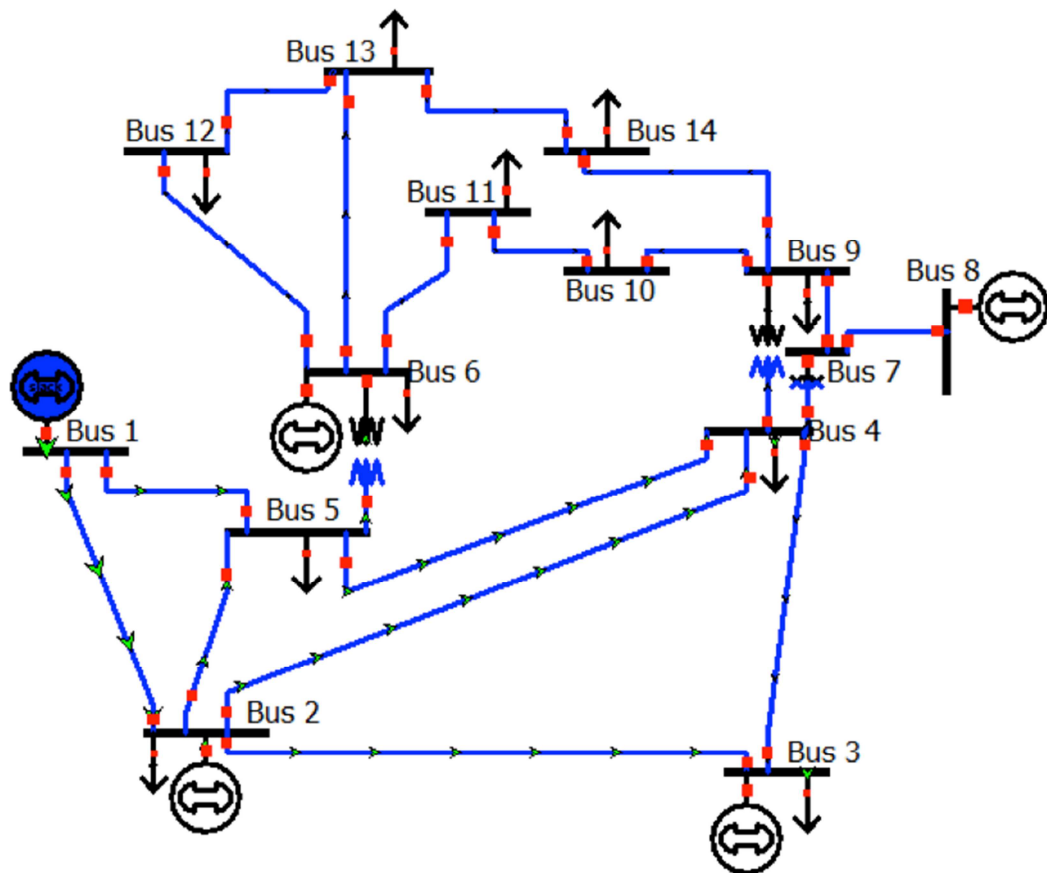


Ilustración 2: Red IEEE14.

Con la red de la *Ilustración 2* se obtuvieron los resultados mostrados en la *Tabla 1*:

Tabla 1: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE14.

T_cond=20 °C	
	RN
P5-1	0
P1-5	0
V1	0
Q3	0
P2-5	0
P1-2	0

La *Tabla 1* muestra los residuos normalizados de mayor valor cuando las resistencias se evalúan a la temperatura de 20°C. En este caso los residuos normalizados son nulos. Es decir, las medidas estimadas y reales son iguales. Esto se debe a que el conjunto de medidas se obtuvo para una red con resistencias a 20°C.

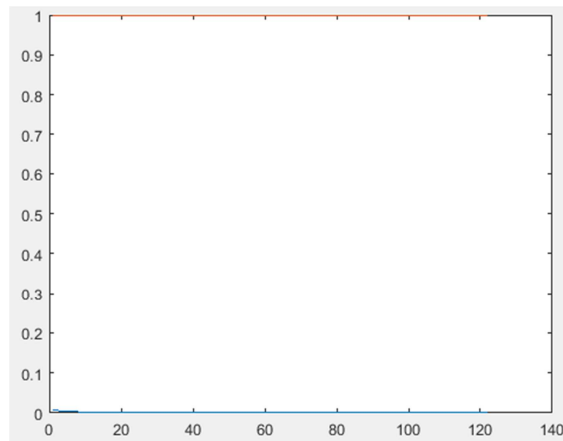


Ilustración 3: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE14.

De igual forma, la *Ilustración 3*, que ordena las medidas de mayor a menor residuo normalizado, muestra que en esta situación todas las medidas presentan residuo normalizado nulo.

Tabla 2: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE14.

T_cond=50°C	
	RN
V1	1,1
V2	0,5
V3	0,4
V14	0,4
Q1-2	0,3
Q5-1	0,3

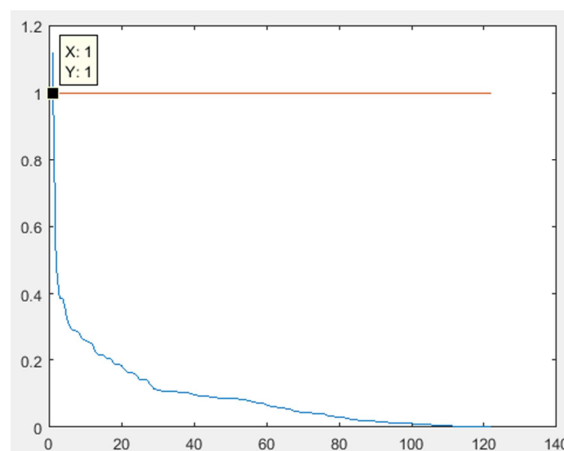


Ilustración 4: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE14.

A continuación se realiza la estimación de estado cuando las resistencias se encuentran a una temperatura del conductor de 50°C. Ello da como consecuencia una serie de RN distinto de cero. Si se observa la *Tabla 2*, se aprecian las seis medidas con mayor valor de residuos normalizados.

Por otro lado, en la *Ilustración 4* se muestra que el número de medidas con un residuos significativo (≥ 0.2) aumenta, ya que ahora el número de medidas con residuo normalizado por encima de este valor asciende a 20. Dicha ilustración ordena las medidas de mayor a menor residuo normalizado.

Posteriormente, se aumenta la temperatura de las líneas a 70°C por lo que cabe esperar que los RN obtenidos de la correspondiente estimación de estado aumenten.

Tabla 3: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE14.

T_cond=70 °C	
	RN
V1	1,9
V2	0,8
V3	0,7
V14	0,6
Q1-2	0,5
P6-5	0,5

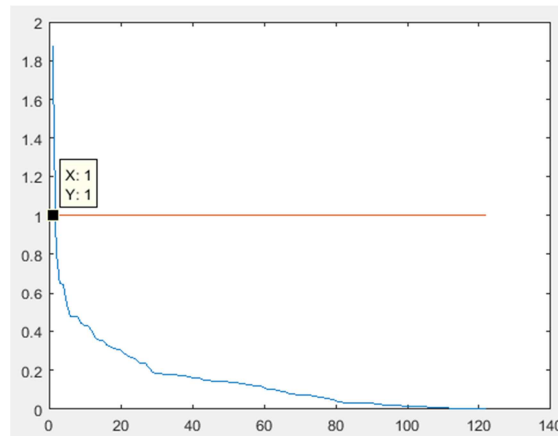


Ilustración 5: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE14.

Cabe destacar que, tras los resultados obtenidos según la *Tabla 3*, no solo aumenta el valor de los residuos, sino también el número de medidas con residuo normalizado significativo, tal y como se muestra en la *Ilustración 5*. En este ensayo, el número de medidas cuyo residuo supera el valor de 0.2 es de 30, por tanto, existe una mayor diferencia entre las medidas estimadas y las que se obtendrían de los instrumentos de medida.

Ello induce a pensar que cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura a la que se toman las medidas y la temperatura a la cual se evalúan las resistencias en el modelo topológico de la red, mayor serán los residuos normalizados. Lo cual significa que el algoritmo de estimación de estado detecta una serie de errores en aquellas medidas que son consideradas como exactas.

Tabla 4: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE14.

T_cond=90 °C	
	RN
V1	2,6
V2	1,2
V3	0,9
V14	0,9
Q1-2	0,7
Q2-4	0,7

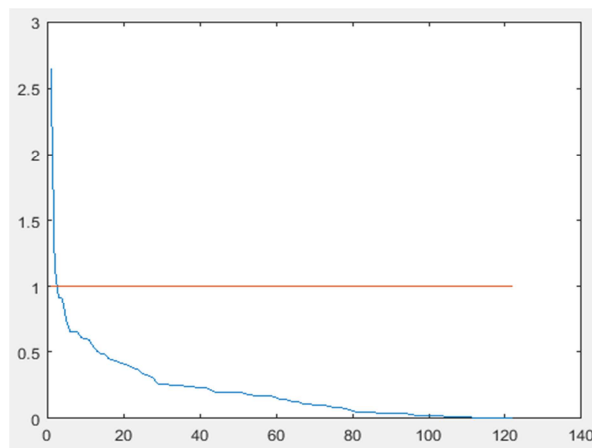


Ilustración 6: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE14.

Si finalmente se analizan los resultados obtenidos de la estimación de estado cuando las resistencias se evalúan a 90°C, se pueden apreciar los mismos fenómenos previamente descritos, con la diferencia que en este caso, los mismos están más pronunciados. Si se observa la *Ilustración 6*, el número de medidas con residuos normalizados distinto de cero aumenta, además del valor de los mismos residuos normalizados (ver *Tabla 4*), llegando incluso a rozar el límite de medida errónea (RN=3).

2.2. Red IEEE24

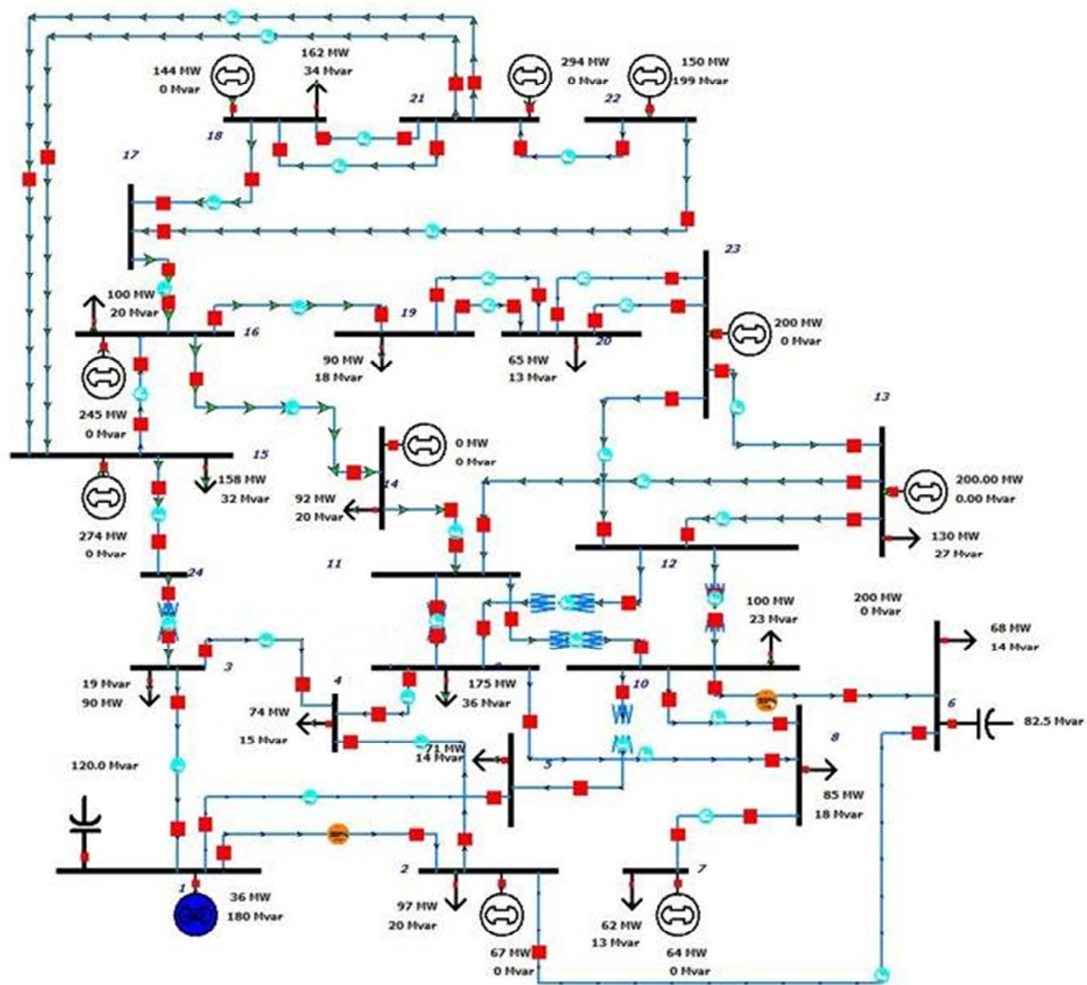


Ilustración 7: Red IEEE24.

Se procede a realizar los mismos ensayos del apartado anterior pero con una red de mayor dimensión.

Tabla 5: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE24.

T _{cond} =20 °C	
	RN
V14	0
V4	0
V24	0
V21	0
V9	0
V20	0

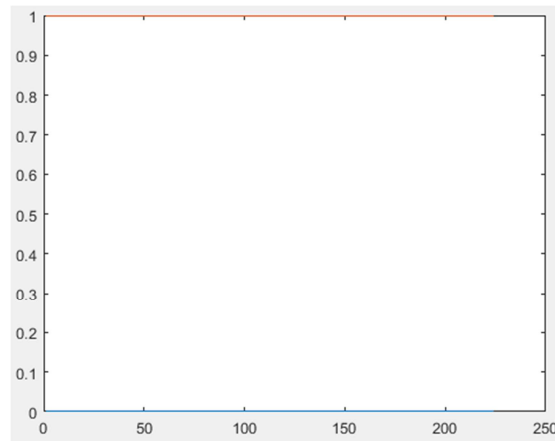


Ilustración 8: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red IEEE24.

Al igual que en el ensayo anterior se observa que cuando la temperatura del conductor es de 20°C el valor de los residuos normalizados es cero. La *Tabla 5* muestra que las seis medidas con residuos normalizado más alto presentan valor cero. Por otro lado, la Ilustración 8 refleja que ninguna medida presenta residuo alguno.

A continuación se realiza la estimación de estado con las medidas obtenidas cuando las líneas se encuentran a 50°C.

Tabla 6: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE24.

T _{cond} =50 °C	
	RN
V22	0,6
V21	0,6
V8	0,6
V7	0,6
V18	0,5
Q16-15	0,5

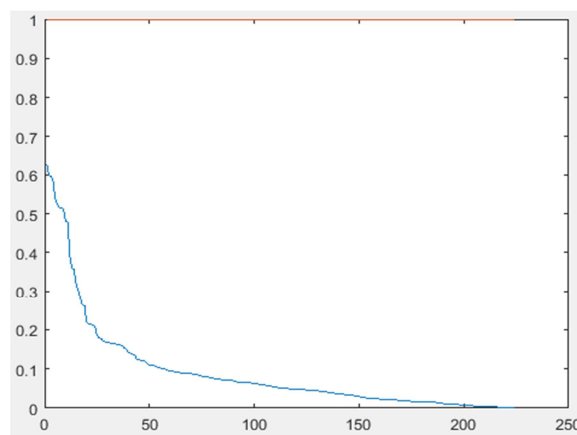


Ilustración 9: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red IEEE24.

La *Tabla 6* muestra que al aumentar la temperatura de los conductores, aumenta el valor de los residuos normalizados además del número de medidas con un RN distinto de cero. Mientras que la *Ilustración 9*, refleja un aumento del número de medidas con residuo normalizado por encima de 0.2, aproximadamente 30 medidas.

Tabla 7: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE24.

T_cond=70°C	
	RN
V22	1,1
V21	1
V8	1
V7	1
V18	0,9
Q16-15	0,9

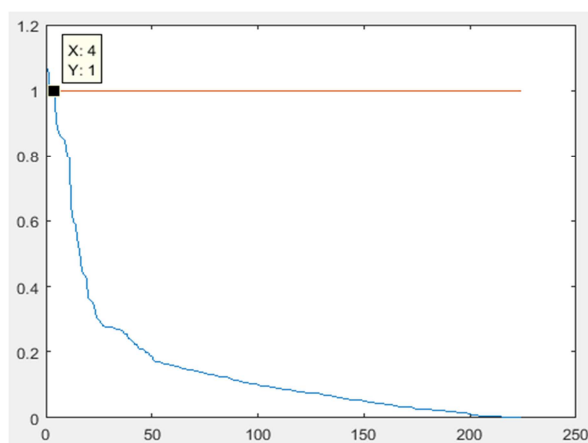


Ilustración 10: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red IEEE24.

Tanto en el ensayo con la temperatura de los conductores a 70°C como en el de 90°C se pueden observar los mismos fenómenos previamente comentados, las medidas presentan mayores residuos normalizados (ver *Tabla 7 y 8*) y el número de medidas con residuos significativos aumenta (ver *Ilustración 10 y 11*).

Tabla 8: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE24.

T_cond=90°C	
	RN
V22	1,5
V8	1,4
V21	1,4
V7	1,3
V18	1,3
Q16-15	1,2

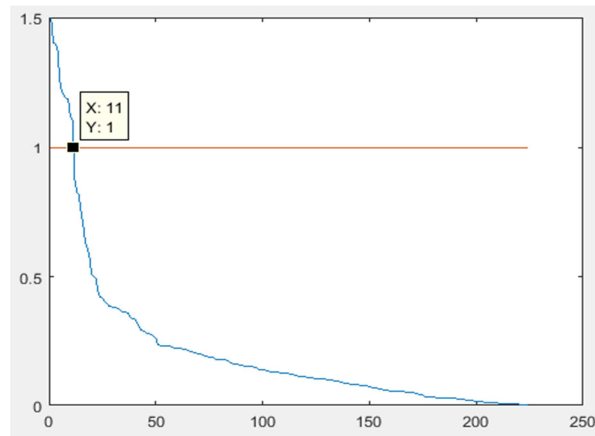


Ilustración 11: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red IEEE24.

Por tanto, una vez más queda reflejada la importancia que puede llegar a tener considerar la temperatura de los conductores a la hora de evaluar los valores de las resistencias en el modelo del sistema utilizado en la estimación de estado.

2.3. Red Kundur

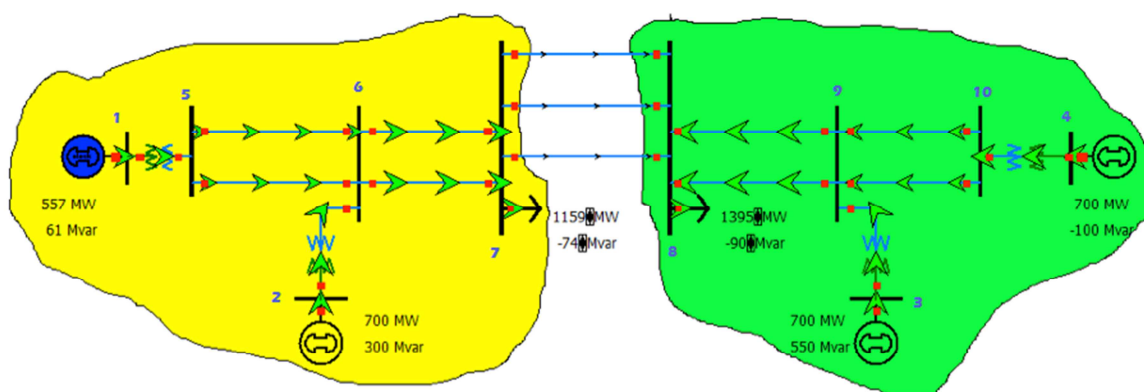


Ilustración 12: Red Kundur.

Al igual que en los ensayos anteriores, se observa que cuando la temperatura de los conductores es igual a la temperatura a la que se evalúan las resistencias de la red (20°C), los residuos normalizados valen de cero.

Tabla 9: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red Kundur.

T _{cond} = 20°C	
	RN
P4-10	0
V10	0
V8	0
Q4-10	0
V2	0
P3-9	0

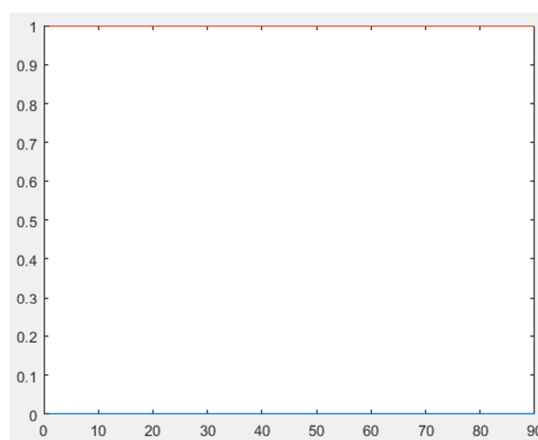


Ilustración 13: RN con la temperatura del conductor a 20°C para la red Kundur.

En la *Tabla 9* se aprecian las medidas con mayor residuo normalizado, en este caso, tienen valor nulo ya que la temperatura de los conductores es de 20°C, al igual que la temperatura a la que se evalúan las resistencias del modelo topológico. Por otro lado, si se observa la *Ilustración 13*, que ordena las medidas de forma descendente según el valor de los residuos normalizados, muestra que ninguna de las medidas presenta valores de los residuos distintos de cero.

A continuación, se lleva a cabo el ensayo cuando la temperatura de los conductores es 50°C. En la *Tabla 10* se observa como el aumento de la temperatura da lugar a un aumento del valor de los residuos normalizados.

Tabla 10: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red Kundur.

T_cond=50°C	
	RN
V1	0,5
V5	0,4
Q8	0,4
V4	0,4
V10	0,3
V6	0,3

Además, al igual que en los ensayos anteriores, el número de medidas cuyo residuo empiezan a ser significativos aumenta. Observando la *Ilustración 14*, se aprecia que el número de medidas con residuo normalizado mayor que 0.2 es aproximadamente 12.

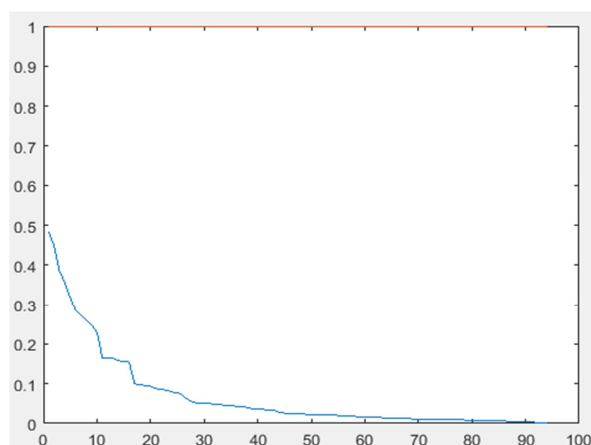


Ilustración 14: RN con la temperatura del conductor a 50°C para la red Kundur.

Los fenómenos antes mencionados son más pronunciados cuando se aumenta la temperatura de las líneas de 50 a 70°C. También se observarán los mismos fenómenos cuando la que la temperatura aumenta a 90°C.

Tabla 11: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red Kundur.

T_cond=70°C	
	RN
V1	0,8
V5	0,7
V4	0,6
V10	0,5
V8	0,5
V3	0,5

La *Tabla 11* refleja un aumento de los residuos respecto a la *Tabla 10*, esto es consecuencia del aumento de la temperatura de los conductores, lo cual da lugar a una mayor diferencia en cuanto a la temperatura a la que se evalúan las resistencias del modelo topológico (20°C).

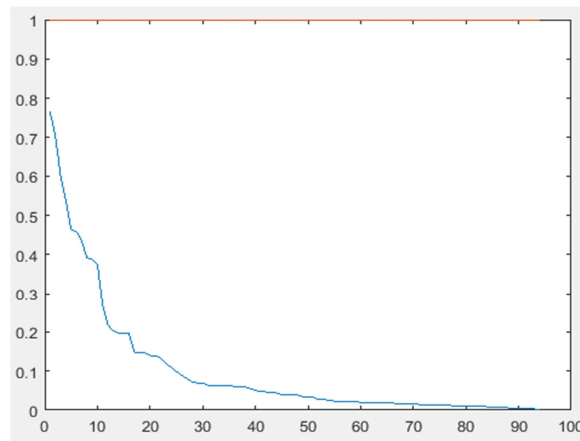


Ilustración 15: RN con la temperatura del conductor a 70°C para la red Kundur.

Además, el número de medidas con residuo significativo aumenta a 15, tal y como se observa en la *Ilustración 15*. Dicha ilustración, permite ver como los residuos aumentan su valor si se compara con los valores que se alcanzan en la *Ilustración 14*.

Los valores de los residuos normalizados de las medidas, que se consideran exactas, empiezan a tomar valores significativos a medida que la diferencia entre la temperatura a la que se encuentra el conductor cuando se toman las medidas y la temperatura a la que se evalúan la resistencias de las líneas que forman la red en el modelo topológico de la estimación de estado.

Finalmente, se repite el ensayo para la temperatura de los conductores de 90°C esperando obtener resultados similares a los anteriores.

Tabla 12: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red Kundur.

T_cond=90°C	
	RN
V1	1
V5	1
V4	0,8
V10	0,8
V3	0,6
V8	0,6

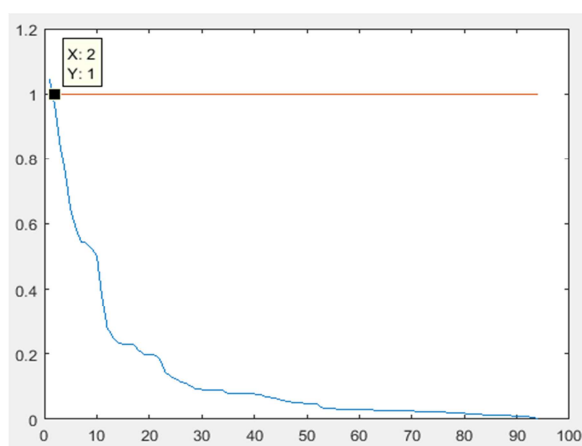


Ilustración 16: RN con la temperatura del conductor a 90°C para la red Kundur.

Tal y como se observa en la *Tabla 12* y la *Ilustración 16*, se observa la misma tendencia que en los ensayos previos. Los residuos normalizados aumentan hasta tal punto en que superan incluso la unidad. Además, el número de medidas con residuo normalizado significativo también aumenta. La *Ilustración 16* muestra aproximadamente 20 medidas cuyos residuos se encuentran por encima de 0.2.

2.4. Conclusiones

Tras haber realizado los ensayos, se puede observar que para cualquier red:

- Los residuos normalizados aumentan conforme la diferencia entre la temperatura a la que se encuentra el conductor cuando se toman las medidas y la temperatura a la que se evalúa la resistencia de las líneas en el modelo topológico, es mayor.

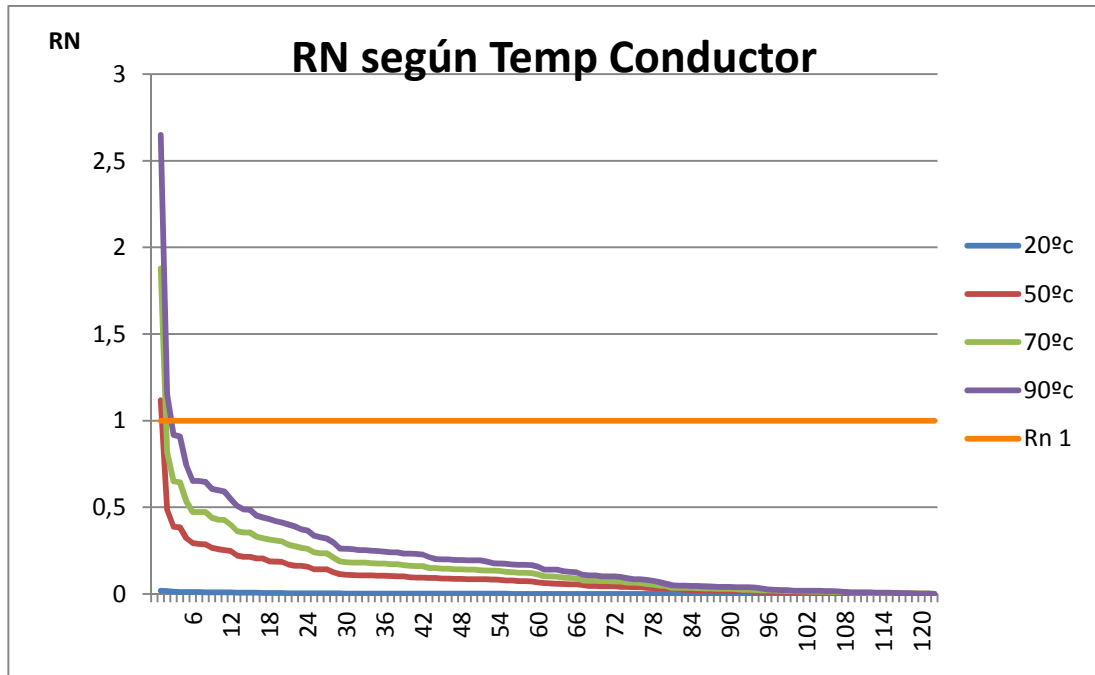


Ilustración 17: Gráfica de residuos normalizados según la temperatura del conductor.

- El número de medidas cuyo RN es distinto de cero aumenta conforme la diferencia entre ambas temperatura sea mayor.
- En algunos casos, los residuos normalizados pueden llegar a ser significativos, llegando incluso a rozar el límite de medidas erróneas (RN=3).

La *Ilustración 17* refleja claramente las conclusiones expuestas en este apartado.

Este análisis muestra la importancia de considerar el efecto de la temperatura del conductor para modificar el valor de las resistencias del modelo topológico de la red. Ya que las medidas obtenidas por los dispositivos pertinentes miden el estado del sistema en unas condiciones de temperatura determinada que, no necesariamente serán 20°C. Con este análisis previo se obtienen los mismos resultados que en el artículo [2].

En el siguiente apartado se desarrollará un modelo que permita realizar la estimación de estado con las medidas en las pertinentes condiciones de operación y carga, y el modelo topológico de la red con los valores de las resistencias de las líneas a 20°C.

3 MODELO DE ESTIMACIÓN DE ESTADO CON SEGMENTACIÓN DE LOS CONDUCTORES

En este apartado se desarrollará un modelo que permite hallar la temperatura de los conductores de la red, actualizar el valor de las resistencias de los mismos y obtener el conjunto completo de medidas del sistema operando cada conductor en unas condiciones de carga y temperatura determinadas, a partir de un reparto de cargas. Este modelo permitirá obtener un sistema eléctrico con parámetros y medidas más cercanos a la realidad. Para ello, el modelo permite segmentar las líneas con objeto de considerar diferentes condiciones ambientales en cada tramo.

Nota: Tal y como está llevado a cabo el estimador de estado, del cual se parte, se dispone de un modelo topológico de la red y de un conjunto de medidas mínimo para poder realizar un reparto de carga. De esta forma se obtienen todas las medidas de la red. Con este conjunto completo de medidas y el modelo topológico se realiza la estimación de estado. Por tanto, si, a priori, no se altera manualmente ninguna de las medidas, el valor de los residuos normalizados será nulo.

Para poder estimar con buena precisión la temperatura del conductor, no sólo habrá que tener en consideración el nivel de carga que soporte cada línea, sino también, la temperatura del ambiente en la que se encuentre cada conductor. Por lo general, las líneas de transporte o subtransporte suelen ser de una longitud considerable, hasta 300 km las más largas.

Ello puede dar lugar a que la temperatura ambiente en la que se encuentra cada extremo del conductor sea diferente una de otra. Incluso si el conductor tiene su extremo inicial en una zona próxima a la costa y su extremo final se encuentra situado en una zona de montaña o del interior de una región, la diferencia de temperatura ambiente entre ambos extremos puede ser considerable. Es por ello que se plantea un modelo de líneas que descomponga cada conductor en varios segmentos, de tal forma que, se añadirán una serie de nudos ficticios con su correspondiente temperatura ambiente, calculada linealmente en función del número de divisiones y de la temperatura de los extremos.

3.1. Segmentación de una Línea

En primer lugar, para facilitar la comprensión, se procede a explicar el procedimiento y lo que implica el proceso de segmentación con una sola línea. Posteriormente, se aplicará a una red sencilla.

Considerando una línea 1-2 como la de la *Ilustración 18*, la cual se ha extraído de una red real en la que se han sustituido los flujos que llegan a los nudos por un generador, que inyecte una potencia activa y reactiva igual al

flujo que existiría si la línea estuviese integrada en la red. De igual forma, se coloca una carga en caso de que el flujo saliese de los nudos.

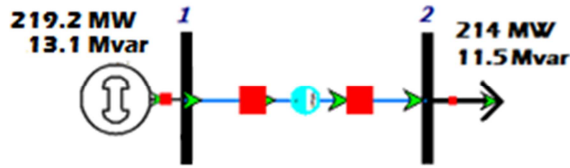


Ilustración 18: Línea 1-2.

Nota: Esta línea se ha obtenido de la red IEEE24 (ver *Ilustración 7*).

Si se toma en consideración la línea 1-2, obviando momentáneamente las cargas de los extremos y, considerando que cada nudo tiene una temperatura ambiente determinada (ver *Ilustración 19*).



Ilustración 19: Línea 1-2 y temperatura ambiente.

A continuación, se divide la red en un número de segmentos, en este ejemplo, dos, y se añaden tantos nudos ficticios como número de segmentos menos uno, en este caso 1, (ver *Ilustración 20*).

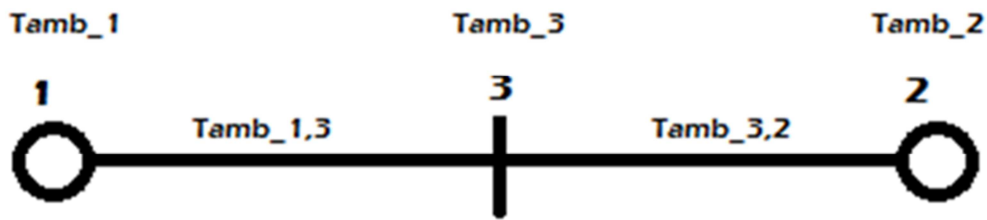


Ilustración 20: Línea 1-2 y temperaturas ambiente tras segmentación.

Donde la temperatura ambiente del nudo 3 será calculada como:

$$\Delta T_{amb} = \frac{T_{amb,i} - T_{amb,f}}{div} \quad (2)$$

$$T_{amb,x} = \min\{T_{amb,i}, T_{amb,f}\} + \Delta T_{amb} \cdot x \quad (3)$$

siendo:

ΔT_{amb} : el incremento de temperatura en el conductor en función del número de segmentos considerados.

$T_{amb,i}$: la temperatura ambiente del nodo extremo inicial.

$T_{amb,f}$: la temperatura ambiente del nodo extremo final.

div : el número de segmentos en los que se divide la red.

x : el número del segmento, comenzando a numerar de izquierda a derecha si el extremo a la izquierda tiene menor temperatura ambiente que el extremo de la derecha. De derecha a izquierda en caso contrario.

Por otro lado, la temperatura ambiente a la que se va a encontrar cada segmento del conductor se calcula como la media entre las temperaturas ambiente de los nodos extremos.

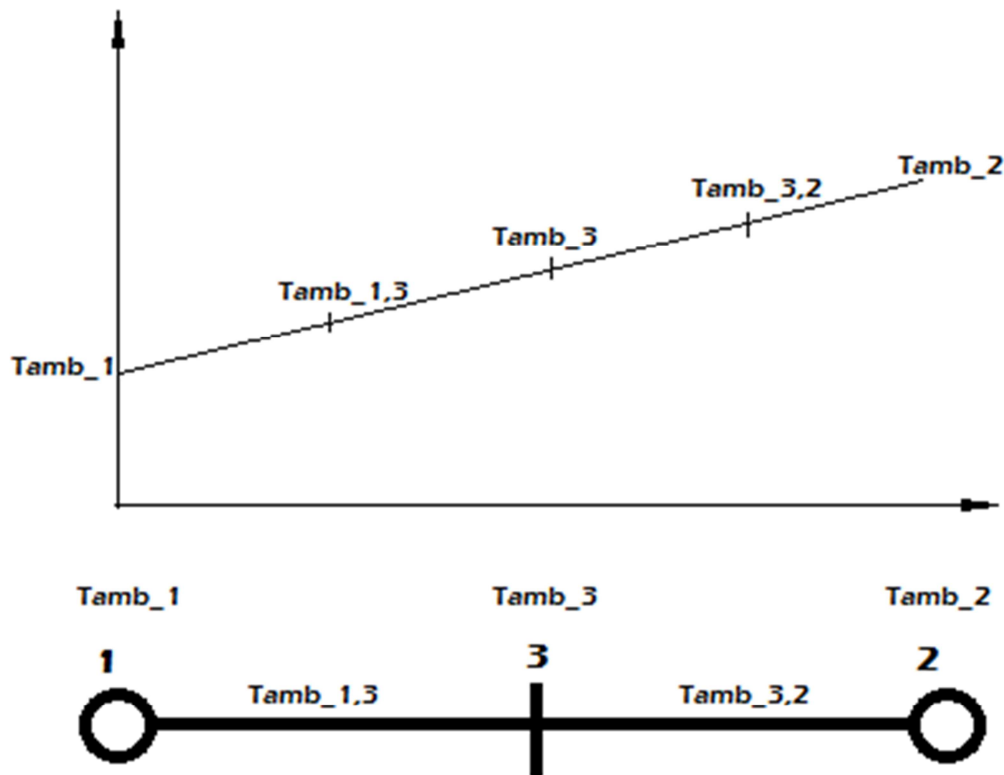


Ilustración 21: Distribución de temperaturas según las divisiones del conductor.

Una vez determinada la temperatura ambiente de cada segmento, es necesario incorporar las condiciones de carga en los nudos ficticios. Es decir, los valores de las inyecciones de potencia activa y reactiva, los cuales serán de valor cero. Por tanto, estas medidas son medidas virtuales. La *Ilustración 22* refleja el paso explicado.

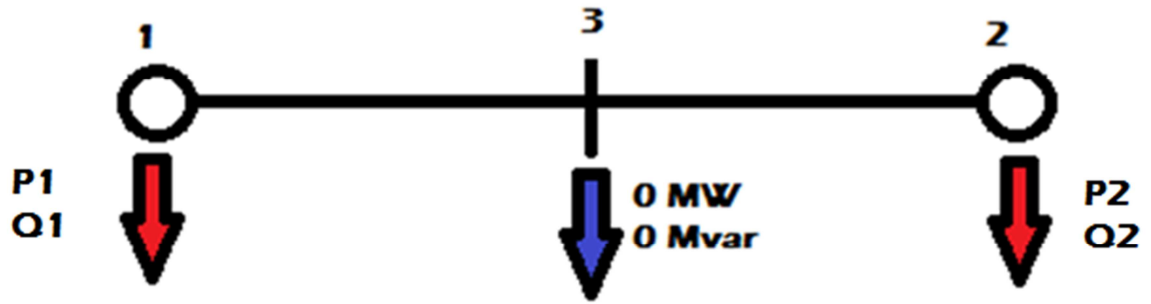


Ilustración 22: Introducción de medidas virtuales.

Para proceder con el valor de las resistencias, reactancias y susceptancias, el valor que toma cada una de ellas en cada uno de los segmentos en los que se descomponen las líneas será:

$$R_i = \frac{R}{div} \quad (4)$$

$$X_i = \frac{X}{div} \quad (5)$$

$$B_i = \frac{B}{div} \quad (6)$$

siendo:

div: el número de segmentos en los que se divide la red.

R: la resistencia total de una rama.

R_i: la resistencia del segmento i de una rama.

X: la reactancia total de una rama.

X_i: la reactancia del segmento i de una rama.

B: la susceptancia total de una rama.

B_i: la susceptancia del segmento i de una rama.

3.2. Segmentación de una Red

El objetivo del presente apartado es esclarecer cómo quedaría una red segmentada según el modelo previamente presentado.

Sea la red de la *Ilustración 23* formada por 6 nudos y 6 ramas:

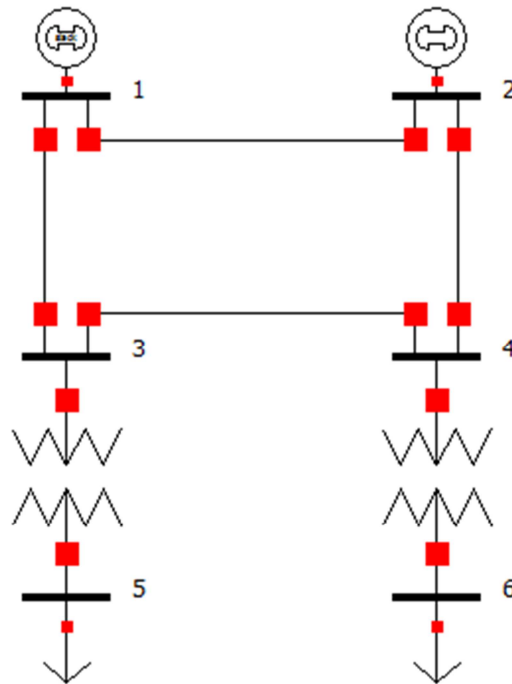


Ilustración 23: Red de 6 nudos y 6 ramas.

Al aplicar el algoritmo de segmentación en dicha red, tomando como número de divisiones igual a 3, el sistema queda:

Nota: El número de divisiones es un parámetro de entrada que se introduce manualmente antes de aplicar el algoritmo.

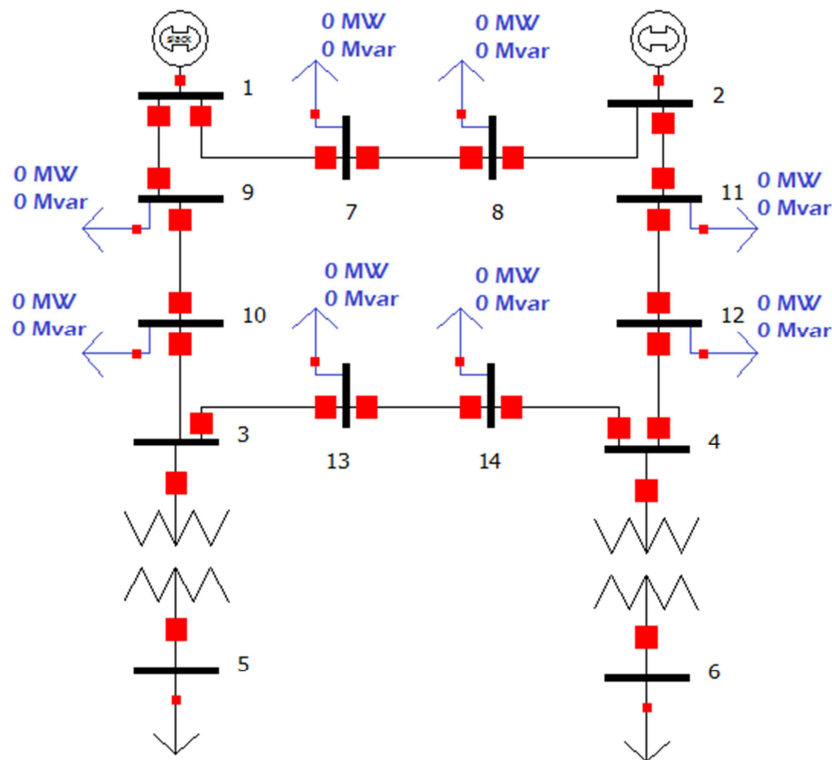


Ilustración 24: Red de 6 nudos y 6 ramas segmentada.

Nótese que no tiene sentido aplicar el modelo de segmentación a los transformadores, por tanto el algoritmo debe ser capaz de discernir entre qué ramas del grafo son líneas de transmisión y cuales son transformadores.

Cada nodo de la red original tendrá asignada una temperatura ambiente determinada, mientras que los nudos ficticios tendrán una temperatura ambiente calculada según las *ecuaciones* 2 y 3. Posteriormente, se asigna a cada segmento una temperatura ambiente igual a la media entre la temperatura ambiente de los nodos extremos.

3.3. Modelo de Cálculo de la Temperatura del Conductor

El desarrollo del modelo se lleva a cabo apoyándose en el Reglamento de Instalaciones de Alta Tensión y Sus Fundamentos Técnicos ITC-RAT 05 [3].

Para obtener las temperaturas de los conductores de la red se plantea un balance de energía en la línea en equilibrio en régimen permanente. Lo cual implica que la potencia generada en forma de calor sea igual que el calor evacuado en unidades de W/m:

$$P_{gen} = P_{evac} \quad (7)$$

La potencia generada en forma de calor se descompone a su vez en cuatro términos en W/m:

- Por efecto Joule: P_J .
- Por el flujo magnético en el interior del conductor (efecto pelicular): P_M .
- Por radiación solar incidente sobre el conductor: P_S .
- Por efecto corona en el conductor: P_i .

Por otra parte, para definir el calor evacuado se tendrán en consideración:

- Por convección: P_c .
- Por radiación: P_r .
- Por evaporación: P_w .

Por tanto la ecuación anterior queda:

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (8)$$

3.3.1. Potencia Generada por Efecto Joule en el Conductor

La potencia generada por efecto Joule, P_J , se calculará como:

$$P_J = I^2 \cdot R'_{cc} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] \quad (9)$$

siendo:

I : la intensidad que circula por el conductor en A.

R'_{cc} : la resistencia del conductor en corriente continua en Ω/m .

α : la variación de la resistencia con la temperatura en K^{-1} .

θ : la temperatura media del conductor en K.

$\theta_{R'_{cc}}$: la temperatura a la que se encuentra la resistencia en K.

3.3.2. Potencia Generada por Efecto del Campo Magnético en el Conductor

El flujo magnético creado por la corriente alterna a través del conductor causa un calentamiento adicional debido a las corrientes inducidas en el propio conductor. Este fenómeno es más significativo en conductores de aluminio-acero y generalmente insignificante en conductores no ferrosos.

El efecto pelicular se tiene en cuenta a través de un aumento de la resistencia del conductor, el cual puede despreciarse en conductores tubulares y un valor adicional inferior al 3% para cables cuya sección sea inferior a 600 mm^2 .

$$P_J + P_M = I^2 \cdot R'_{ca} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] \quad (10)$$

$$R'_{ca} = R'_{cc} \cdot (1 + y_s) \quad (11)$$

siendo:

R'_{ca} : la resistencia del conductor en corriente alterna considerando el efecto pelicular en Ω/m .

y_s : el porcentaje que aumenta la resistencia de corriente continua debido al efecto pelicular en pu.

Nota: R'_{cc} y R'_{ca} están a la misma temperatura.

Para el desarrollo de los ensayos, se supondrá que el conductor es de aluminio, y al ser un metal no ferroso, se considerará despreciable el efecto pelicular. No obstante se considerará para el diseño del modelo el parámetro

y, aunque tendrá un valor nulo.

3.3.3. Potencia Generada por Efecto de la Radiación Solar sobre el Conductor

La potencia debida a la radiación solar, P_s , que incide sobre el conductor se expresa por la siguiente ecuación:

$$P_s = \alpha_s \cdot \Psi \cdot D_{ext} \quad (12)$$

donde:

α_s : es un coeficiente adimensional que representa la absorción de calor a través de la superficie del conductor. Varía entre 0.23 para conductores de aluminio brillante y 0.95, para conductores degradados en ambiente industrial según. En la mayoría de los casos se toma un valor de 0.5.

Ψ : la radiación solar en la zona geográfica donde está instalado el conductor en W/m^2 .

D_{ext} : el diámetro exterior del conductor en m.

Para el modelo de cálculo de temperatura del conductor se supondrán tres tipos de cables en función del nivel de tensión:

- Si el nivel de tensión es inferior a 133 kV la sección será de 250 mm^2 . Es decir, $D_{ext}=17.8 \text{ mm}$.
- Si el nivel de tensión es superior a 133 kV e inferior a 220 kV la sección será de 400 mm^2 . Es decir, $D_{ext}=22.6 \text{ mm}$.
- Si el nivel de tensión es superior a 220 kV la sección será de 600 mm^2 . Es decir, $D_{ext}=27.64 \text{ mm}$.

Por otro lado, el coeficiente de absorción de calor se considerará 0.5.

Para determinar la radiación solar en una determinada zona geográfica, supondremos que los ensayos se realizan en España y en condiciones desfavorables, en el mes de Junio. Se emplean datos de la red de estación climatológica automática española Meteoclimatic, la cual pone a disposición pública valores de la radiación solar sobre el territorio español.

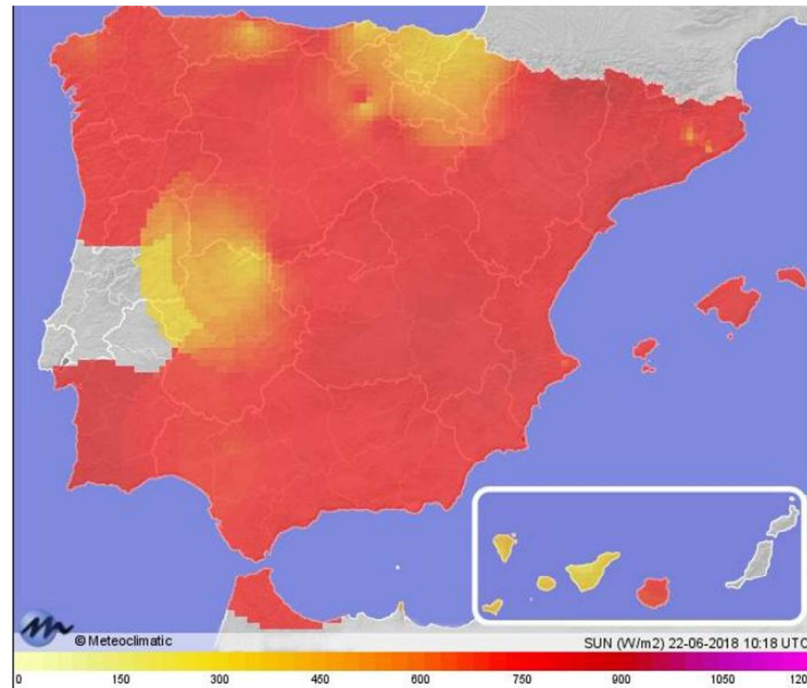


Ilustración 25: Mapa de radiación solar en España en el mes de Junio.

Por tanto, con el fin de simplificar el modelo, se tomará un valor representativo del territorio de 750 W/m^2 . Estas condiciones de radiación solar son durante las horas diurnas y en condiciones nocturnas dicho término sería nulo. No obstante, con objeto de buscar las situaciones más desfavorables se supondrán condiciones diurnas.

3.3.4. Potencia Generada por Efecto Corona

El calentamiento por el efecto corona solo es significativo con gradientes de tensión en la superficie del conductor muy elevados, los cuales pueden presentarse en caso de precipitaciones y fuertes vientos. En estas circunstancias las corrientes de convección y de refrigeración por evaporación son elevadas. Por tanto, el calentamiento por este efecto no se incluirá en los cálculos.

Además, para ser coherentes con las suposiciones de radiación solar consideradas, en verano las precipitaciones en España son escasas.

3.3.5. Evacuación de Calor por Convección

En la elaboración del modelo se ha supuesto convección forzada ya que esta es la que se suele dar en la mayoría de los casos. Una convección natural implicaría velocidad del viento nula. Además, empleando datos de la web de representación de datos meteorológicos sobre el territorio español <http://www.atmosfera.lma.fi.upm.es/> se supone la velocidad del viento constante e igual a 1 m/s para todo el

territorio español.

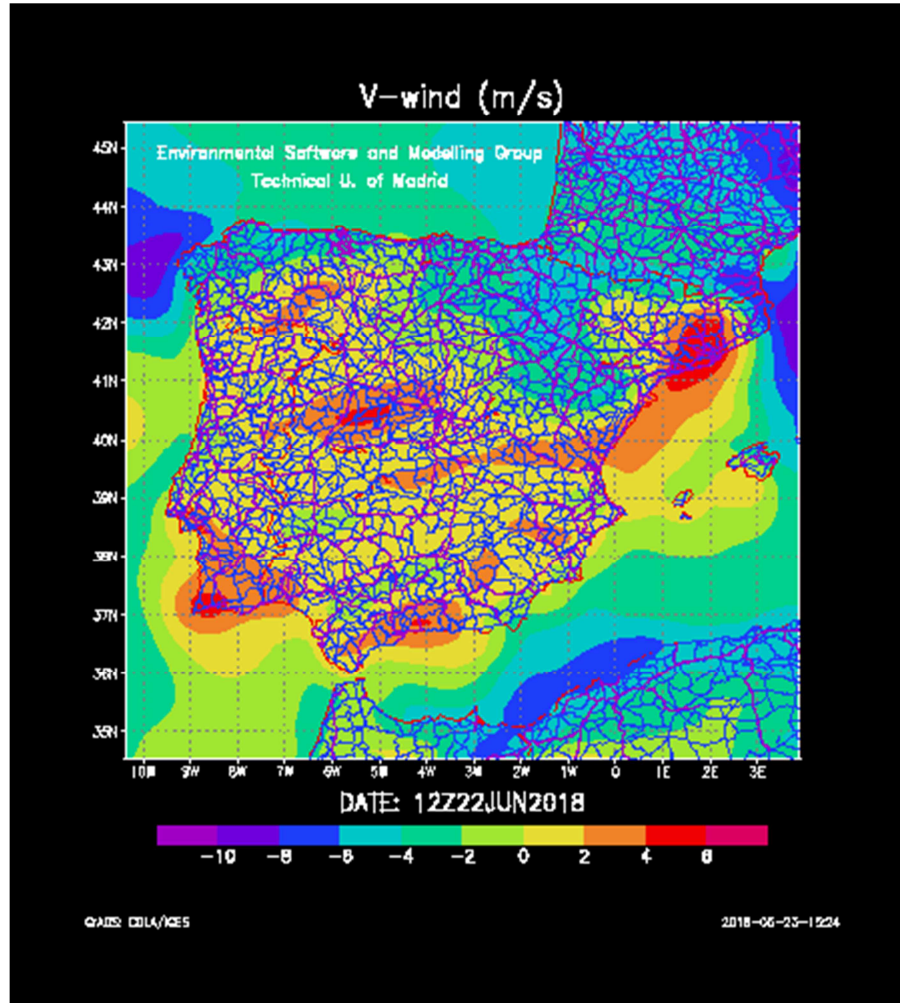


Ilustración 26: Mapa de nivel de viento en España en el mes de Junio.

Por tanto la ecuación general que describe la convección es la siguiente:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (\theta - \theta_{amb}) \cdot Nu_\theta \quad (13)$$

$$\lambda_f = 2.42 \cdot 10^{-2} + 7.2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_f \quad (14)$$

$$\theta_f = \frac{\theta + \theta_{amb}}{2} - 273 \quad (15)$$

siendo:

λ_f : la conductividad térmica del aire en función de la temperatura en W/(m K).

Nu_θ : el número de Nusselt que depende del tipo de conducción a aplicar (natural o forzada) y del ángulo de

incidencia del viento respecto al eje del conductor.

θ : la temperatura media del conductor en K.

θ_{amb} : la temperatura ambiente en K.

Para el cálculo del número de Nusselt hay que tener en cuenta el ángulo de incidencia Nu_{ξ} . En general se recomienda utilizar un valor de 45° , por lo que en el modelo se tomará un Angulo de incidencia de 45° . La expresión del número de Nusselt es:

$$Nu_{\theta} = Nu_{90} \cdot (A_1 + B_2 \cdot \text{sen}^{m_1}(\theta)) \quad (16)$$

Tabla 13: Parámetros del número de Nusselt según el ángulo de incidencia del viento.

θ	A_1	B_2	m_1
$0^\circ \leq \theta < 24^\circ$	0.42	0.68	1.08
$24^\circ \leq \theta < 90^\circ$	0.42	0.58	0.90

Para velocidades del viento < 0.5 m/s, donde el ángulo de incidencia del viento es poco significativo, la expresión utilizada es:

$$Nu_{\theta} = 0.55 \cdot Nu_{90} \quad (17)$$

donde:

Nu_{90} : el número de Nusselt para conversión forzada cuando el viento es perpendicular al eje del conductor.

Calculándose según la siguiente expresión:

$$Nu_{90} = B_1 \cdot Re^n \quad (18)$$

siendo Re : el número de Reynolds.

A continuación es necesario definir la rugosidad del conductor R_f y el número de Reynolds:

$$R_f = \frac{d}{d_{ext} - d} \quad (19)$$

d : el diámetro de uno de los alambres del conductor.

Si se supone que el diámetro exterior será como máximo el doble de uno de los alambres del conductor, R_f

será ≤ 0.5 .

El número de Reynolds se calculará como:

$$Re = \frac{\rho_r \cdot v \cdot D_{ext}}{\nu_f} \quad (20)$$

$$\rho_r = e^{-1.16 \cdot 10^{-4} \cdot y} \quad (21)$$

siendo:

ρ_r : la densidad relativa del aire que depende de la altura sobre el nivel del mar, y .

v : la velocidad del viento en m/s.

ν_f : la viscosidad cinemática del aire en m^2/s .

Para mayor simplicidad del modelo se supone una altura de 1000 m sobre el nivel del mar, lo que da lugar a una densidad relativa de 0.890475. El valor de la viscosidad cinemática del aire para esa altura y rango de temperaturas ambiente [0-45] °C se tomará igual a $1.585 \cdot 10^{-5} m^2/s$ (ver *Tabla 14*).

Tabla 14: Propiedades del aire según distinta altitud.

altitud H km	temperatura t °C	presión absoluta P_a kPa	densidad ρ kg/m ³	viscosidad dinámica $\mu \cdot 10^5$ N·s/m ²	viscosidad cinemática $\nu \cdot 10^4$ m ² /s
0	15,00	101,33	1,225	1,789	0,146
2	2,00	79,50	1,007	1,726	0,171
4	-4,49	70,12	0,909	1,661	0,183
6	-23,96	47,22	0,660	1,595	0,242
8	-36,94	35,65	0,526	1,527	0,290
10	-49,90	26,50	0,414	1,458	0,352
12	-56,50	19,40	0,312	1,422	0,456
14	-56,50	14,17	0,228	1,422	0,624
16	-56,50	10,35	0,166	1,422	0,857
18	-56,50	7,57	0,122	1,422	1,166
20	-56,50	5,53	0,089	1,422	1,598
22	-54,58	4,05	0,065	1,432	2,203
24	-52,59	2,97	0,047	1,443	3,070
26	-50,61	2,19	0,034	1,454	4,276
28	-48,62	1,62	0,025	1,465	5,860
30	-46,64	1,20	0,018	1,475	8,194

Por tanto con los valores del número de Reynolds y la rugosidad del conductor, obtienen los valores de B1 y n de la *Tabla 15*:

Tabla 15: Parámetros del Nusselt para un ángulo de incidencia del viento de 90° según el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie.

Rugosidad de la superficie	Re		B1	n
	Desde	Hasta		
Cualquier R_f	10^2	$2.65 \cdot 10^3$	0.641	0.471
$R_f \leq 0.05$	$> 2.65 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	0.178	0.633
$R_f > 0.05$			0.048	0.800

3.3.6. Evacuación de Calor por Radiación

La ecuación que describe la potencia calorífica evacuada por radiación responde a la ecuación:

$$P_r = \pi \cdot D_{ext} \cdot \xi \cdot \sigma_B \cdot (\theta^4 - \theta_{amb}^4) \quad (22)$$

siendo:

ξ : el coeficiente de emisividad del conductor, con un valor representativo de 0.5.

σ_B : la constante de Stefan-Boltzmann de valor $5.68 \cdot 10^{-8}$ en $W/(m^2 \cdot K)$.

θ : la temperatura media del conductor en K.

θ_{amb} : la temperatura ambiente en K.

D_{ext} : el diámetro exterior del conductor en m.

3.3.7. Evacuación de Calor por Evaporación

La evacuación de calor por evaporación es significativa cuando el conductor se moja por la lluvia. No obstante, el enfriamiento por evaporación se desprecia ya que permite estar en el lado de la seguridad, además de tratarse de un régimen permanente.

3.3.8. Cálculo de la temperatura de equilibrio en el conductor

Por tanto la ecuación final del modelo queda:

$$\begin{aligned}
& I^2 \cdot R'_{cc} \cdot (1 + y_s) \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] + \alpha_s \cdot \Psi \cdot D_{ext} = \\
& = \pi \cdot \left[2.42 \cdot 10^{-2} + 7.2 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\theta + \theta_{amb} - 2.273}{2} \right) \right] \cdot (\theta - \theta_{amb}) \cdot Nu_{\xi} + \pi \cdot D_{ext} \cdot \xi \cdot \sigma_B \cdot (\theta^4 - \theta_{amb}^4)
\end{aligned}
\tag{23}$$

Donde todo es dato o conocido del proceso de Estimación de Estado, salvo la temperatura del conductor θ , que es la incógnita a calcular.

3.3.9. Simplificación del Modelo

Está fuera del alcance del proyecto un estudio exhaustivo de la temperatura del conductor ante una variación de los parámetros físicos y térmicos del sistema. Por ello se definen a continuación los valores que se tomarán. La justificación de los mismos ha sido mencionada en los apartados anteriores:

- El coeficiente de temperatura del aluminio $\alpha = 4.07 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.
- El coeficiente que modela el efecto pelicular $y_s = 0$.
- El coeficiente de absorción solar $\alpha_s = 0.5$.
- La radiación solar en la zona geográfica $\Psi = 750 \text{ W/m}^2$.
- El diámetro exterior se obtiene de la *Tabla 16*.

Tabla 16: Diámetro exterior según el nivel de tensión.

Nivel de tensión (KV)	D _{ext} (mm)
< 133	17.8
133 ≤ N _v < 220	22.6
≥ 200	27.64

- La velocidad del viento $v = 1$ m/s.
- El ángulo de incidencia del viento sobre el conductor $\theta = 45^\circ$.
- La altura sobre el nivel del mar $y = 1000$ m.
- La viscosidad cinemática del aire $\nu_f = 1.585 \cdot 10^{-5}$ m²/s.
- La rugosidad de la superficie del conductor $R_f \leq 0.5$.
- El coeficiente de emisividad del conductor $\xi = 0.5$.

Nota: los valores de la intensidad, I , resistencia del conductor, R'_{cc} , temperatura a la que se encuentra la resistencia, $\theta_{R'_{cc}}$, y la temperatura del ambiente, θ_{amb} , son entradas de la función del modelo de cálculo de la temperatura del conductor.

Si a continuación definimos las siguientes constantes:

$$A = I^2 \cdot R'_{cc} \cdot (1 + y_s) \quad (24)$$

$$B = \alpha_s \cdot \Psi \cdot D_{ext} \quad (25)$$

$$C = \pi \cdot D_{ext} \cdot \xi \cdot \sigma_B \quad (26)$$

$$D = \pi \cdot 2.42 \cdot 10^{-2} \cdot Nu_\xi \quad (27)$$

$$E = \frac{\pi}{2} \cdot 7.2 \cdot 10^{-5} \cdot Nu_\xi \quad (28)$$

El modelo queda:

$$\begin{aligned} A \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] + B = \\ = D \cdot (\theta - \theta_{amb}) + E \cdot (\theta^2 - \theta_{amb}^2) - E \cdot 2 \cdot 273(\theta - \theta_{amb}) + C \cdot (\theta^4 - \theta_{amb}^4) \end{aligned} \quad (29)$$

Si se desarrolla cada término y se agrupan los términos dependientes de θ y los que no:

$$C \cdot \theta^4 + E \cdot \theta^2 + (D - A \cdot \alpha - 2 \cdot E \cdot 273) \cdot \theta = cte \quad (30)$$

donde:

$$cte = C \cdot \theta_{amb}^4 - E \cdot \theta_{amb}^2 + (D - 2 \cdot E \cdot 273) \cdot \theta + A \cdot (1 - \alpha \cdot \theta_{R'_{cc}}) + B \quad (31)$$

De esta forma, la temperatura del conductor depende exclusivamente de la temperatura ambiente a la que se encuentre la línea o segmento de la misma, ya que, el resto de parámetros son conocidos.

3.3.10. Filtrado de la Solución

Se dispone de un modelo cuadrático para estimar la temperatura del conductor. Ello implica que para una situación determinada el modelo da cuatro posibles soluciones. Lo cual no tiene sentido desde el punto de vista de la realidad.

Si se analiza cualitativamente cada término del modelo, los términos elevados a la cuarta, al cuadrado e independiente son ≥ 0 , mientras que el término simple puede ser ≥ 0 ó ≤ 0 . En este caso se puede demostrar matemáticamente que las soluciones de esta ecuación serán:

- Dos soluciones complejas, donde una es conjugada de la otra.
- Dos soluciones reales ambas ≥ 0 o una ≥ 0 y otra ≤ 0 .

En este caso se requiere incorporar al modelo que determina la temperatura del conductor una serie de restricciones que permita para cada línea hacer un filtrado de las 4 posibles soluciones de cada una.

En primer lugar, desde el punto de vista físico, no tiene sentido una temperatura con valores complejos, por tanto estas dos soluciones conjugadas se eliminan de la posible solución.

Por otro lado, si las unidades de la solución son en 'kelvin', carece de sentido físico que en las condiciones en que se encuentre la red se encuentren temperaturas por debajo del cero absoluto. Sin embargo puede acotarse más aun la solución. Si se está despreciando fenómenos como el efecto corona o la evacuación de calor por evaporación, ello implica que no tenga sentido que se obtengan temperaturas de los conductores por debajo de 273 K.

Nota: Está fuera del alcance del proyecto ensayos con temperaturas ambientes por debajo de 0 °C si por la línea no circula una intensidad suficiente que haga que la temperatura del conductor supere el citado límite.

Finalmente, en caso de que el modelo devuelva como solución dos temperaturas ≥ 273 K, se elimina aquella que supere los 400 K ya que por seguridad, la temperatura máxima del aislamiento no debe superar los 85 °C.

Nota: Se ha añadido un margen de 27 °C en la condición anterior de filtrado de soluciones, para evitar

problemas de dimensiones de la matriz de temperaturas en algunos casos extremos o de estado de la red que excedan los límites.

3.3.11. Cálculo de las temperaturas de líneas que sean transformadores

El modelo planteado anteriormente exclusivamente tiene sentido para aquellas ramas que sean líneas. Para los casos en que se disponga de transformadores, se debe emplear un modelo que tenga en cuenta la temperatura de funcionamiento del transformador.

Según las especificaciones técnicas de los fabricantes de transformadores, el límite de la temperatura del punto más caliente del núcleo del transformador no debe superar los 130 °C.

Según IEEE & IEC la temperatura del punto más caliente del transformador no debe superar los 140 °C, aunque se recomienda que no supere los 130 °C.

Queda fuera del alcance del proyecto elaborar un modelo de temperatura para los transformadores, por lo que se tomarán las siguientes simplificaciones:

- Las redes emplearan tres tipos de transformadores:
 - Transformadores de 230 MVA para alta tensión, más de 220 kV.
 - Transformadores de 150 MVA para alta-media tensión, 220 KV a 133 kV.
 - Transformadores de 50MVA para media tensión menos de 133 kV.
- La temperatura aumenta con el cuadrado del módulo de la intensidad. La intensidad se puede expresar como $I = S/V$ en módulo, por tanto la temperatura aumenta con el cuadrado de la potencia compleja.
- La máxima temperatura posible del transformador 130 °C tiene lugar cuando el transformador trabaja a potencia nominal S_n .
- Como mínimo el transformador se encontrará a la temperatura de 25 °C.

Se elabora pues, una función cuadrática del tipo:

$$T = a \cdot S^2 + b \cdot S + c \quad (32)$$

para cada tipo de transformador.

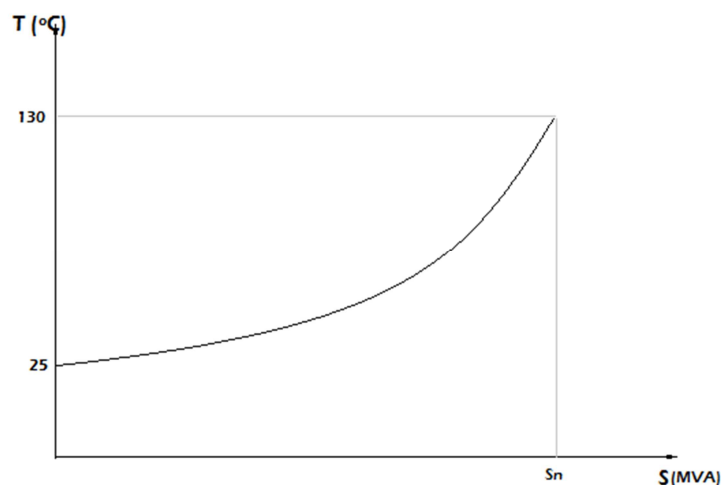


Ilustración 27: Modelo de temperatura de los transformadores.

Las condiciones de contorno impuestas para obtener el polinomio de orden dos son:

- $S=0 \rightarrow T=25^{\circ}\text{C}$
- $S=S_{\max} \rightarrow T=130^{\circ}\text{C}$
- $S=2/3 \cdot S_{\max} \rightarrow T=65^{\circ}\text{C}$

siendo:

S : la potencia aparente del transformador.

S_{\max} : la potencia aparente máxima del transformador.

T : la temperatura de trabajo del transformador.

Según el nivel de tensión del bobinado de alta de los transformadores se aplica un modelo u otro según se indica en la *Tabla 17*.

Tabla 17: Parámetros del modelo de temperatura de los transformadores según el nivel de tensión.

Nivel de tensión (KV)	a	b	c
< 133	540	-60	25
$133 \leq N_v < 220$	60	-20	25
≥ 200	25.52	-13.04	25

3.4. Justificación del Modelo

Con el mismo ejemplo de la *Ilustración 18*, se pretende ilustrar como se aplican los modelos expuestos en los apartados previos, además de justificar que tiene sentido emplear un modelo de segmentación. Se realiza un

ensayo donde se muestra el efecto de disponer de distintas temperaturas ambiente en los nudos de la línea 1-2 con dos divisiones, es decir, la línea 1-2 se divide en los segmentos 1-3 y 3-2. Dicha línea es de 200 km y 230 kV. La resistencia de la línea a 20°C ya que son los valores de resistencias que se tienen en cuenta en los esquemas de las redes por las empresas distribuidoras. Las medidas serán aquellas que se obtengan en el estado real de temperaturas a la que se encuentre sometida la red. Por ello, parece conveniente que las medidas propias para realizar una Estimación de Estado se vean afectadas por la temperatura correspondiente del sistema, tanto ambiente como del conductor.

Cabe esperar que al realizar una Estimación de Estado de la red con las resistencias evaluadas a 20°C y las medidas consideradas antes mencionadas, de lugar a una serie de residuos normalizados distintos de cero.

Nota: En los resultados que se muestran a continuación ya se ha implementado el modelo de cálculo de temperatura del conductor. Se muestran con objeto de visualizar qué se pretende obtener con la realización del modelo propuesto.

$T_{amb} =$		$T_{cond} =$			
1	12	1	3	0	71.9
2	24	3	2	0	75.0

$R_{12}=4,34 \cdot 10^{-5} \text{ ohm/m}$

RN	
V1	0,5
V2	0,5
P2-1	0,2
P1-2	0,2
P2	0,2
P1	0,1

Ilustración 28: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente variable.

Nota 1: Todas las temperaturas están en °C.

Nota 2: El valor de la resistencia de la Ilustración 28, es el valor de dicho parámetro para la línea 1-2. El valor de los parámetros de cada uno de los dos segmentos en que se divide la línea se obtiene tal y como se explica en el apartado 3.1.

Tal y como se muestra en la Ilustración 28, los nudos 1 y 2 presentan una temperatura ambiente diferente, 12°C para el nudo 1 y 24°C para el nudo 2. Siguiendo el modelo de segmentación, el nudo ficticio, 3, presenta una temperatura ambiente igual a 18°C, obtenida según la ecuación 2 y 3. Por tanto, la temperatura ambiente a la que se encuentra el segmento 1-3 es la media de la temperatura ambiente de sus nudos extremos, 15°C. Mientras que para el segmento 3-2, se toma una temperatura ambiente de 21°C. Esta diferencia de temperatura ambiente de los segmentos de una misma línea da lugar a una mayor diferencia de temperaturas de los segmentos 1-3 y 3-2, siendo estos valores 71.9 y 75°C respectivamente.

Nota: Para entender cómo se obtienen las temperaturas de los conductores ver apartado 3.3.

Cuando la temperatura ambiente de los nudos es diferente se aprecian residuos normalizados significativos, por tanto esta situación justifica el modelo de segmentación de las líneas de una red para determinar los valores que deben tomar las resistencias del modelo topológico de la red. Ya que los segmentos de una misma línea presentan temperaturas diferentes y con una diferencia importante.

A continuación, se realiza otro ensayo donde se pretende simular la misma línea con la temperatura ambiente es de 20°C en toda la línea.

T_cond =				T_cond =			
1	3	0	49.3	1	3	0	75.5
3	2	0	49.5	3	2	0	76.1
R ₁₂ =4,34*10 ⁻⁵ ohm/m				R ₁₂ =9,63*10 ⁻⁵ ohm/m			
RN				RN			
V1	0,5			V1	1,7		
V2	0,5			V2	1,6		
P2-1	0,2			P2-1	0,7		
P1-2	0,2			P2	0,6		
P2	0,2			P12	0,6		
P1	0,2			P1	0,4		

Ilustración 29: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente de 20°C.

Nota: Todas las temperaturas están en °C. La temperatura de cada uno de los conductores se ha obtenido tal y como se especifica en el apartado 3.3.

En este ensayo se puede apreciar cómo según aumenta el valor que tome la resistencia de la línea 1-2, la temperatura de funcionamiento del conductor crece, además del valor de los residuos normalizados, que llegan a ser significativos (ver *Ilustración 29*). Cuando la resistencia tiene un valor de $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m, la temperatura de los segmentos, en esa situación de carga y temperatura ambiente, es aproximadamente 45°C. Sin embargo, si la resistencia de la misma línea valiese $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m, la temperatura de los segmentos estaría cerca de los 75.8°C.

Llama la atención que la línea 1-2, la cual se descompone en los segmentos 1-3 y 3-2, presentan temperaturas de los conductores levemente distintas pese a que en ambos extremos se dispone de la misma temperatura ambiente. Esto se debe a que el flujo que circula por el segmento 1-3 es ligeramente mayor que el flujo de la línea 3-2 debido a las pérdidas de cada segmento (ver *Tabla 18*). Además, al ser el flujo de potencia distinto, la temperatura de cada segmento será algo diferente, dando lugar a resistencias de distinto valor. Si este proceso se lleva a cabo durante 3 iteraciones (ver apartado 4.3.2) la diferencia entre temperaturas de los segmentos podrá ser más notable.

Nota: Cuanto mayor sea el valor de las resistencias y mayor la diferencia de las temperaturas ambiente en los extremos de la línea, mayor diferencia térmica existirá entre los segmentos.

Tabla 18: Flujos de potencia activa y reactiva de la línea 1-2 segmentada para $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m.

Medida	Circuito	Valor (pu)
P 1-3	0	2.1924
P 3-2	0	2.1502
Q 1-3	0	0.5990
Q 3-2	0	0.5387

En cuanto a los residuos normalizados, en el primer caso, ninguno de los residuos supera el valor de 0.5, mientras que, en el segundo, superan incluso la unidad.

Se repite el mismo ensayo anterior modificando ahora la temperatura ambiente hasta los 40°C en toda la línea.

T _{cond} =					T _{cond} =				
1	3	0	67.1		1	3	0	80.6	
3	2	0	67.3		3	2	0	80.9	
R ₁₂ =4,34*10 ⁻⁵ ohm/m					R ₁₂ =9,63*10 ⁻⁵ ohm/m				
RN					RN				
V1	0,8				V1	2,3			
V2	0,8				V2	2,2			
P2-1	0,4				P2-1	1			
P1-2	0,3				P2	0,8			
P2	0,3				P1-2	0,8			
P1	0,3				P1	0,6			

Ilustración 30: Temperatura de conductores, valor de resistencia y RN de la estimación de estado para temperatura ambiente de 40°C.

Nota: Todas las temperaturas están en °C.

Si se observa la *Ilustración 30*, se obtienen los mismos resultados que en el ensayo anterior. Un aumento deñl valor de la resistencia tiene como consecuencia unos valores de temperaturas de los segmentos mucho mayor, además de mayores residuos normalizados.

Por otro lado, al comparar los dos ensayos realizados, se observa que al aumentar la temperatura ambiente, también lo hacen los residuos normalizados y la temperatura del conductor, (ver *Ilustración 29* e *Ilustración 30*).

Al igual que en el ensayo anterior, existe una diferencia de temperaturas entre los conductores de un mismo segmento, debido a la pérdidas que se producen en cada segmento. Esto da lugar a que el flujo de potencia tanto activa como reactiva 1-3 y 3-2 sean ligeramente diferentes (ver *Tabla 19*).

Tabla 19: Flujos de potencia activa y reactiva de la línea 1-2 segmentada para $4.34 \cdot 10^5$ ohm/m.

Medida	Circuito	Valor (pu)
P 1-3	0	2.1924
P 3-2	0	2.1475
Q 1-3	0	0.5990
Q 3-2	0	0.5395

Queda por tanto justificada la necesidad de emplear un modelo de segmentación cuando la temperatura ambiente en los extremos de las líneas es diferente. Este hecho es el más habitual, por lo que se empleará el modelo de segmentación para los ensayos realizados en el apartado 6.

3.5. Justificación del Número de Divisiones de las Líneas en el Modelo de Segmentación

En este apartado se pretende determinar el número mínimo de segmentos en los que dividir las líneas de las redes al aplicar el modelo expuesto en el presente documento. A priori, cuanto mayor sea el número de divisiones, más preciso será la estimación de la temperatura de los conductores. No obstante, un elevado número de divisiones dar lugar a un mayor coste computacional en el algoritmo de estimación de estado, ya que al aumentar el número de nudos y de líneas (segmentos), dicha herramienta emplea un mayor tiempo de cálculo, haciendo inviable la aplicación a tiempo real.

Por tanto, en este apartado se persigue determinar el número de divisiones que permita obtener resultados aceptables y que a su vez no requiera un número de segmentos por línea elevado.

Para llevar a cabo dicha justificación, se emplea el ejemplo de la línea de la *Ilustración 18*, la cual se somete a tres estados de cargas: un nivel de carga bajo, otro medio y un tercero, elevado. Además, dicha línea presenta valores de temperaturas ambiente de 12°C y 24°C en los nudos 1 y 2 respectivamente.

En primer lugar, se analiza el valor de los residuos normalizados, según los distintos niveles de carga, aplicando el modelo que sin realizar segmentación, comparándolo con el mismo modelo aumentando el número de divisiones progresivamente, desde dos hasta 4.

En la *Tabla 20* se observan cinco columnas; una primera que indica el nivel de carga, una segunda que muestra los resultados para el modelo sin segmentar, y la tercera, cuarta y quinta columna, reflejan los residuos normalizados para el modelo aplican dos, tres y cuatro divisiones por línea respectivamente.

Tabla 20: Comparación de RN según el número de segmentos y nivel de carga.

Nivel de Carga	Sin Segmentar		Multisegmento					
			2 Segmentos		3 Segmentos		4 Segmentos	
	Medida	RN	Medida	RN	Medida	RN	Medida	RN
Bajo	V2	0,057	V2	0,051	V2	0,047	V2	0,045
	V1	0,054	V1	0,050	V1	0,046	V1	0,044
	P2-1	0,013	P2-1	0,011	P2-1	0,010	P2-1	0,009
	P1-2	0,011	P1-2	0,010	P1-2	0,009	P1-2	0,008
	P2	0,009	P2	0,008	P2	0,008	P2	0,008
	P1	0,008	P1	0,007	P1	0,007	P1	0,007
Medio	V2	0,195	V2	0,173	V2	0,168	V2	0,164
	V1	0,194	V1	0,172	V1	0,167	V1	0,164
	P2-1	0,088	P2-1	0,054	P2-1	0,052	P2-1	0,051
	P1-2	0,067	P1-2	0,048	P1-2	0,046	P1-2	0,045
	P2	0,053	P2	0,041	P2	0,040	P2	0,039
	P1	0,041	P1	0,037	P1	0,036	P1	0,035
Alto	V1	0,58	V1	0,479	V1	0,474	V1	0,471
	V2	0,572	V2	0,472	V2	0,468	V2	0,466
	P2-1	0,221	P2-1	0,211	P2-1	0,207	P2-1	0,205
	P1-2	0,25	P1-2	0,190	P1-2	0,187	P1-2	0,186
	P2	0,193	P2	0,163	P2	0,160	P2	0,159
	P1	0,156	P1	0,145	P1	0,143	P1	0,142

En primer, se destaca de la *Tabla 20* que, al aumentar el nivel de carga, aumentan los residuos normalizados. Este hecho se analizará en mayor profundidad en el apartado 6. El objeto de esta tabla es permitir comparara para cada nivel de carga, el valor que toman los residuos normalizados según se aumenta el número de segmentos en los que se divide de la línea de la *Ilustración 18*.

En general, para un mismo nivel de carga, un aumento del número de divisiones da lugar a una disminución de los residuos normalizados obtenidos como consecuencia de la estimación de estado pertinente. Sin embargo, esta reducción de los valores es más pronunciada cuando se comparan los resultados del modelo sin segmentar con los del modelo con dos divisiones. Por ejemplo, los residuos normalizados en el estado de nivel medio de carga, de las tensiones de los nudos 1 y 2 presentan un valor de 0.194 y 0.195 respectivamente, aplicando el modelo sin segmentar. Mientras que, cuando se aumenta el número de divisiones a dos, estos valores se reducen a 0.172.

Si se aumenta el número de divisiones a 4, los residuos normalizados siguen la misma tendencia, aunque estos disminuyen en menor medida. Con cuatro segmentos, la tendencia a disminuir continua, pero la diferencia es aún menor.

Para apreciar mejor la diferencia entre los residuos normalizados entre un modelo y contiguo, se muestra la *Tabla 21*.

Tabla 21: Diferencia de RN entre modelos según el número de segmentos empleados.

Nivel de Carga	Diferencia entre RN		
	Sin seg- 2 seg	2 seg - 3 seg	3 seg - 4 seg
Bajo	0,006	0,004	0,002
	0,004	0,004	0,002
	0,002	0,001	0,001
	0,001	0,001	0,001
	0,001	0,000	0,000
	0,001	0,000	0,000
Medio	0,022	0,005	0,004
	0,022	0,005	0,003
	0,034	0,002	0,001
	0,019	0,002	0,001
	0,012	0,001	0,001
	0,004	0,001	0,001
Alto	0,101	0,005	0,003
	0,100	0,004	0,002
	0,010	0,004	0,002
	0,060	0,003	0,001
	0,030	0,003	0,001
	0,011	0,002	0,001

Si se observa la *Tabla 21*, la diferencia entre residuos es mucho mayor entre el modelo sin segmentar y el que emplea dos segmentos. Esta diferencia se hace mucho menor al comparar los residuos del modelo empleando 2 y 3 segmentos, y prosigue la tendencia al comparar el modelo empleando 3 y 4 divisiones, siendo esta último la de menor diferencia.

En principio, puede determinarse que con 2 o 3 divisiones el modelo de segmentación presenta resultados bastante precisos, ya que la diferencia entre los residuos de ambos casos reside en la tercera cifra decimal. Esta diferencia también tiene lugar con 4 segmentos, pero el número de nudos y líneas aumentaría considerablemente.

A continuación se muestra en la *Tabla 22* la temperatura que toma cada uno de los conductores de la línea.

Tabla 22: Temperatura de los conductores según el número de divisiones y nivel de carga.

Nivel de Carga	Sin Segmentar		Multisegmento					
			2 Segmentos		3 Segmentos		4 Segmentos	
	Rama	T_cond (°C)	Segmento	T_cond (°C)	Segmento	T_cond (°C)	Segmento	T_cond (°C)
Bajo	1-2	27,5	1-3	25,6	1-3	24,6	1-3	24,2
			3-2	28,7	3-4	26,7	3-4	25,7
					4-2	28,7	4-5	27,2
							5-2	28,7
Medio	1-2	34,5	1-3	32,6	1-3	31,7	1-3	31,2
			3-2	35,7	3-4	33,7	3-4	32,7
					4-2	35,7	4-5	34,2
							5-2	35,7
Alto	1-2	47,3	1-3	45,4	1-3	44,5	1-3	44,0
			3-2	48,4	3-4	46,4	3-4	45,5
					4-2	48,4	4-5	47,0
							5-2	48,4

Se observa que a medida que aumenta el número de segmentos, la temperatura que toma cada uno aumenta gradualmente según el número de segmentos de los que se disponga. Sin embargo, cuando la línea está sin segmentar, se asigna un valor que dista bastante de la temperatura del segmento del extremo que tiene menor temperatura ambiente.

De nuevo cuando el número de segmentos es igual a 3, se obtiene una mejor precisión en cuanto a la estimación de la temperatura de los conductores. No obstante, aunque el modelo que emplea 2 divisiones presenta resultados de temperatura ambiente algo distintos a los modelos empleando 3 y 4 divisiones, los resultados de la estimación de estado son bastante precisos y, empleará un menor tiempo de cálculo y obtención de resultados que el modelo que divide la línea en 3 segmentos.

Finalmente, una vez se aplica el algoritmo de segmentación y cálculo de temperatura de los conductores, habrá que actualizar el valor de las resistencias de los segmentos y, posteriormente, devolver las líneas a la topología de la red original, es decir, reunificar los segmentos que componen las líneas originales.

Nota: Este proceso se explica con mayor detalle en el apartado 4.

Una vez se han reunificado los segmentos, las resistencias presentarán valores distintos al original, ya que se han modificado consecuencia de considerar la temperatura de los conductores. En la *Tabla 23* se muestran los valores de las resistencias para los ensayos realizados en el presente apartado, para los distintos valores de cargas y el modelo empleando los distintos números de segmentos.

Tabla 23: Valores de la resistencia de la línea tras unificar segmentos según el nivel de carga y número de segmentos empleados en el modelo.

Nivel de Carga	Sin Segmentar	Multisegmento		
		2 Segmentos	3 Segmentos	4 Segmentos
	R Unif. ($\cdot 10^5 \Omega/m$)	R Unif. ($\cdot 10^5 \Omega/m$)	R Unif. ($\cdot 10^5 \Omega/m$)	R Unif. ($\cdot 10^5 \Omega/m$)
Bajo	4,48777	4,46264	4,45444	4,45048
Medio	4,61156	4,58511	4,57717	4,57321
Alto	4,83744	4,80729	4,79962	4,79591

La *Tabla 23* se observa que los valores de la resistencia empleando un número de divisiones u otro son similares. Se puede apreciar una mayor diferencia entre las resistencias del modelo que no realiza segmentación y el modelo que emplea 2 segmentos, ya que la diferencia se encuentra a partir de la primera o segunda cifra significativa. Para analizar mejor las diferencias entre los valores se expone la *Tabla 24*.

Tabla 24: Diferencias de resistencias unificadas según nivel de carga y número de divisiones de modelo empleado.

Nivel de Carga	Diferencia entre Resistencias Unificadas ($\cdot 10^5 \Omega/m$)		
	Sin seg- 2 seg	2 seg - 3 seg	3 seg - 4 seg
Bajo	0,0251	0,0082	0,0040
Medio	0,0264	0,0079	0,0040
Alto	0,0301	0,0077	0,0037

Si se comparan las diferencias entre las resistencias empleando un número de divisiones u otro, se puede ver en la *Tabla 24* que la mayor diferencia se sitúa al comparar el modelo sin segmentar con el que emplea 2 divisiones. Por otro lado, la diferencia entre el modelo que emplea 2 y 3 divisiones es mucho menor, ya que la diferencia se observa a partir de la 3 cifra significativa. Esta tendencia continúa al comparar el modelo que realiza 3 y 4 segmentaciones. La diferencia es aún menor, pero del mismo orden que el caso anterior.

Por tanto, si la diferencia entre emplear dos divisiones o tres es pequeña, interesa emplear un modelo de segmentación que realice dos divisiones, ya que el coste computacional será mucho menor al utilizar una red con menor número de nudos y líneas. Sólo en el caso de que se desee una estimación de la temperatura de los conductores con elevada precisión se debe emplear un mayor número de segmentos, 3 ó 4.

4 ALGORITMO

Planteado el modelo de segmentación de las líneas y el modelo de cálculo de temperatura del conductor, se procede a describir el algoritmo para obtener los ficheros que permitan realizar la estimación de estado realista. Es decir, un fichero con el modelo topológico de la red con las resistencias a 20°C y un fichero con las medidas del sistema en las condiciones de temperatura y carga correspondiente.

Para ello, se seguirá el siguiente esquema:

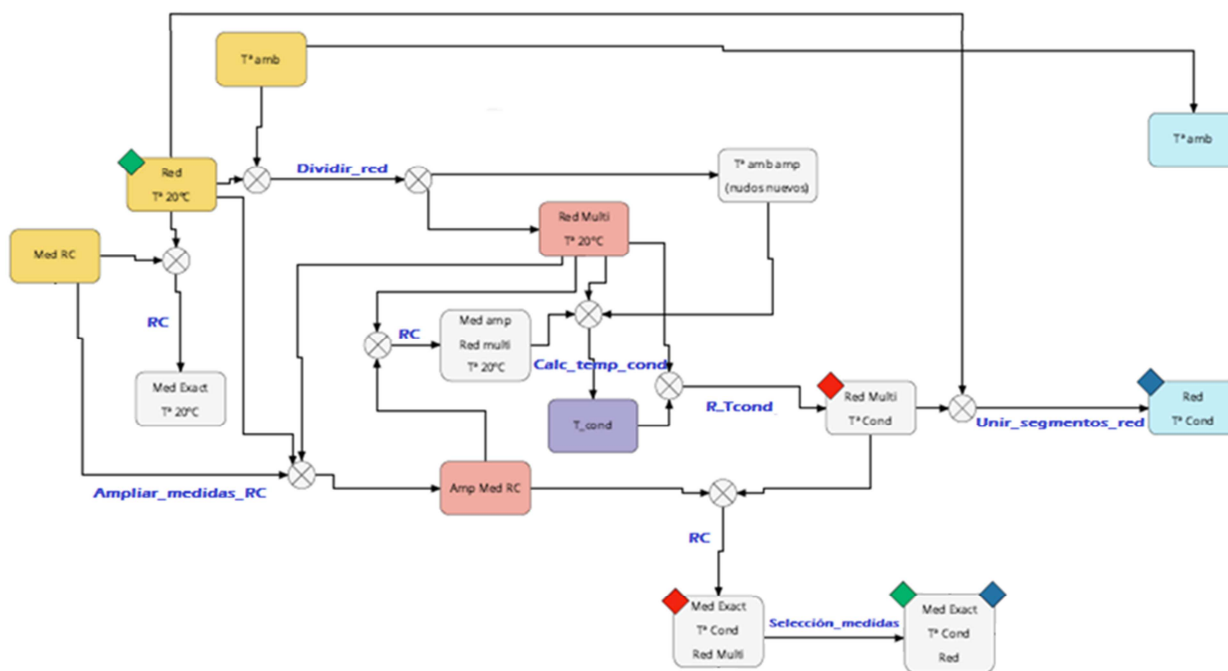


Ilustración 31: Diagrama de bloques y funciones del algoritmo de segmentación y cálculo de temperatura de conductores y medidas.

Nota: en la *Ilustración 31* se muestran los ficheros principales del algoritmo, ya que existen otros ficheros secundarios que por simplicidad del esquema no aparecen reflejados.

En primer lugar se dispone de un fichero con la topología de la red donde los valores de las resistencias están calculados a 20°C. Además, se requiere de un fichero con la temperatura ambiente a la que se encuentra cada nodo y un fichero con las medidas mínimas necesarias para un reparto de cargas.

Posteriormente, se segmenta la red según el número de divisiones que se establezcan, mediante la función

‘Dividir_red’. En ésta, no sólo se obtiene un fichero de la red con los nudos ficticios y la división de las líneas, sino que también se crea un fichero que asigne a los nudos ficticios una temperatura ambiente, tal y como se explicó en los apartados anteriores. Con esto, se calculará también la temperatura ambiente de cada segmento.

Por otro lado, mediante con la función ‘Ampliar_medidas_RC’ se hace una copia del fichero de medidas para un reparto de cargas y se añaden las medidas virtuales en los nudos ficticios. Es decir, se añade para cada nodo ficticio creado: $P_i = 0$ y $Q_i = 0$.

A continuación, se hace un reparto de cargas ‘RC’ para obtener un conjunto completo de medidas de la red multisegmentos. Esta etapa será indispensable ya que se requiere obtener los flujos de potencia activa y reactiva por cada línea, para con ellos, calcular las intensidades correspondientes a cada segmento que será empleado en el cálculo de la temperatura del conductor. Esta función se incluía en las funciones de partida.

La función ‘Calc_temp_cond’ permitirá calcular en función de los parámetros ambientales, meteorológicos y de carga, qué temperatura tiene cada conductor, obteniéndose un fichero con las mismas. El siguiente paso consiste en modificar el valor de las resistencias de la red segmentada según la temperatura del fichero obtenido. Para ello se empleará la función ‘R_Tcond’.

Terminada esta fase, se realiza un reparto de cargas con la red multisegmento con las resistencias a la temperatura del conductor y las medidas ampliadas (medidas + medidas virtuales), para obtener así un conjunto completo de medidas. De esta forma se obtendrán todos los flujos de potencia activa y reactiva por cada segmento, y con ello las intensidades.

Finalmente, con la función ‘Selección_medidas’ se eligen de todo el conjunto de medidas obtenidas, cuales se corresponden con la red que originalmente se tenía. Aplicando el ejemplo de la línea para esclarecer qué hace esta función (ver *Ilustración 32*):

Sean los nudos reales 1 y 2, además del ficticio 3. Al hacer el reparto de cargas se obtendrán, entre otras medidas: P_{1-3} , P_{3-2} , P_{2-3} y P_{3-1} . Las medidas P_{1-3} se corresponderá con P_{1-2} de la red original y P_{2-3} con P_{2-1} . Se obtendrá lo homologa con los flujos de potencia reactiva.

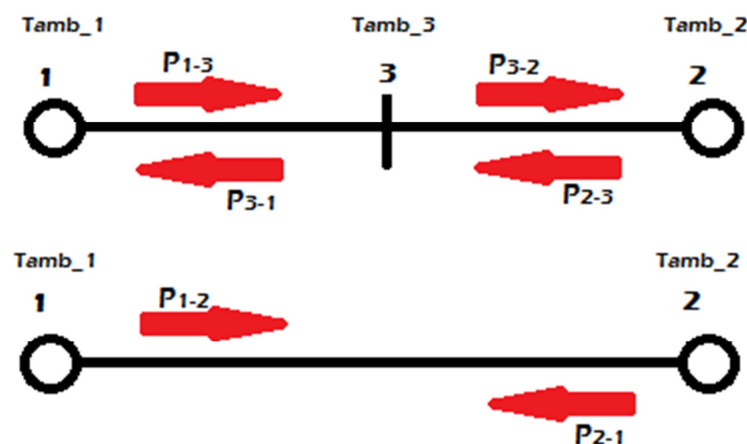


Ilustración 32: Identificación de medidas.

De igual forma, se debe seleccionar las tensiones e inyecciones de P y Q correspondientes a la red original, ya que en la red original no se dispone de los nudos ficticios.

También es conveniente obtener una red con una topología idéntica a la red original pero con los valores de las resistencias tomados a la temperatura del conductor correspondiente. Para ello se sumarán las resistencias que componen los segmentos de cada línea de la red original. De igual forma se procede con la reactancia y susceptancia.

Sin embargo, con este algoritmo se emplean unas intensidades obtenidas a partir de un reparto de cargas con una red que tenía las resistencias calculadas a 20°C, por lo que puede ser que las temperaturas de los conductores no sean las precisas que reflejen una situación fiel a la realidad. Por tanto, se aplica un proceso iterativo para obtener unas temperaturas reales que no difieran entre una iteración y la siguiente. Ahora los ficheros de entrada del algoritmo son la nueva red obtenida (modelo topológico original pero con los valores de las resistencias modificados a la temperatura correspondiente de los conductores), además del fichero de temperaturas ambiente y fichero de medidas mínimas para el reparto de carga.

En la siguiente iteración, las intensidades, calculadas a partir de los flujos de P y Q resultantes de proceso de reparto de cargas, serán de mayor precisión y próximas a la realidad. Se harían tantas iteraciones hasta que la diferencia entre las temperaturas de las líneas entre una iteración y la anterior se encuentre por debajo un cierto umbral admisible.

En el apartado 4.3.2 se comprobará que no es necesario realizar la programación de un proceso iterativo hasta que converja, ya que tras una segunda iteración y la tercera la diferencia es inferior a 0.3°C. Por lo que con tres iteraciones se considera que se obtiene una temperatura suficientemente adecuada para las resistencias de las líneas.

Nota: En los apartados siguientes se procede a explicar con mayor detalle cada una de las funciones, indicándose los ficheros necesarios, entradas y salida.

4.1. Función 'Dividir_red'

Como antes se comentó, esta función tiene por objeto segmentar la red según el número de divisiones que se le establezca. Además, esta función también se encarga de asignar una temperatura ambiente a los nudos ficticios y con ello determinar la temperatura ambiente de cada segmento, tal y como se indica en el apartado 3.1. .

Otros aspectos que se llevan a cabo con esta función es crear una matriz que contenga cada una de las líneas segmentadas de la red en la que además, se añade una tercera y cuarta columna que indique el número de circuito (en caso de líneas paralelas) y el tipo de rama (línea o transformador), ya que cada una se trata de forma distinta. Cabe mencionar que, por motivos de unidades en las que se requieren las resistencias para la función que obtiene la temperatura del conductor, se debe segmentar también las longitudes de las líneas, es decir, dada una longitud total inicial, asignar a cada segmento una longitud. Todos estos segmentos serán de igual dimensión.

En primer lugar, esta función requiere los siguientes ficheros y parámetros de entradas:

- Fichero de red original.
- Fichero de longitudes de la red.
- Fichero de las temperaturas ambientes de cada nudo.
- Número de divisiones en los que segmentar cada una de las líneas.

Como resultados de la misma, se obtienen las siguientes salidas:

- Fichero de la red segmentada.
- Fichero con las ramas de la red, el circuito y el tipo de rama (línea o transformador).
- Fichero de temperaturas ambientes, ampliadas para todas las ramas de la nueva red.
- Fichero con el orden de los nuevos nudos. Es decir, se presenta en una matriz cada rama con su nudo origen, los nuevos nudos ficticios y el nudo destino correspondiente.

Notas: Este fichero será de vital importancia para ordenar, realizar la selección de medidas y unificar los segmentos de las líneas.

- Fichero con las nuevas longitudes de las líneas tras haber realizado la segmentación de las mismas.
- Fichero que asigna un nivel de tensión correspondiente a cada línea. En caso de ser un transformador, se asigna el nivel de tensión del lado de alta.

Esta función trata de forma diferente las ramas que forman la red, ya que no tiene sentido segmentar un transformador. Dicha función debe ser capaz de discernir entre un tipo de rama y otro. Para ello compara los niveles de tensión de los nudos extremos; en caso de ser iguales, se trata de una línea y, si son distintos, de un transformador.

El proceso de segmentación de las líneas se explicó en el apartado **3.1.** . No obstante, si se trata de un transformador el procedimiento cambia, ya que no tiene sentido realizar una división de este tipo de rama. Por motivos de mantener las dimensiones de la matriz de ramas de la nueva red, las ramas correspondientes a un transformador tendrán la siguiente estructura: nudo origen, tantos ceros como nudos ficticios hubiese que añadir si la rama fuera una línea, el nudo destino, el número de circuito y el tipo de rama.

Nota: En caso de tratarse de una línea, la matriz de ramas tendría la misma estructura sustituyendo los ceros por los números correspondientes a los nudos ficticios de cada rama.

```

ramas_m = [
    1      8      9      2      0      1
    1     10     11      3      0      1
    2     12     13      3      0      1
    2     14     15      4      0      1
    2     16     17      5      0      1
    2     18     19      6      0      1
    3     20     21      4      0      1
    4     22     23      5      0      1
    5     24     25      7      0      1
    6     26     27      7      0      1
    6     28     29      7      1      1
];

```

Ilustración 33: Ejemplo de matriz de ramas de una red segmentada.

De igual forma, el fichero de temperaturas ambiente ampliadas para los nuevos nodos contendrá dos columnas que indiquen el nodo origen y nodo destino, el número de circuito, el tipo de rama y la temperatura ambiente de cada segmento.

```

temp_amb_amp =
    1      8      0      1      25
    8      9      0      1      25
    9      2      0      1      25
    1     10      0      1      25
    10     11      0      1      25
    11      3      0      1      25
    2     12      0      1      25
    12     13      0      1      25
    13      3      0      1      25
    2     14      0      1      25
    14     15      0      1      25
    15      4      0      1      25
    2     16      0      1      25
    16     17      0      1      25
    17      5      0      1      25
    2     18      0      1      25
    18     19      0      1      25
    19      6      0      1      25
    3     20      0      1      25
    20     21      0      1      25
    21      4      0      1      25
    4     22      0      1      25
    22     23      0      1      25
    23      5      0      1      25
    5     24      0      1      25
    24     25      0      1      25
    25      7      0      1      25
    6     26      0      1      25
    26     27      0      1      25
    27      7      0      1      25
    6     28      1      1      25
    28     29      1      1      25
    29      7      1      1      25

```

Ilustración 34: Ejemplo de matriz de ampliación de temperaturas ambiente para cada rama.

Nota: Todas las temperaturas están en °C.

4.2. Función ‘Ampliar_medidas_RC’

Esta función se encarga de añadir las condiciones de contorno a los nuevos nudos. Es decir, asocia unos valores de potencia activa y reactiva inyectada nulos, tal y como se aprecia en la *Ilustración 35*.

```
mmedinyp=[
  1  1.01853000  0.02910000
  2  1.30038000  0.02910000
  3 -1.10000000  0.02910000
  4  0.15032000  0.02910000
  5 -1.30000000  0.02910000
  6  0.00327000  0.02910000
  7  0.01729504  0.02910000
  8  0.00000000  0.00010000
  9  0.00000000  0.00010000
 10  0.00000000  0.00010000
 11  0.00000000  0.00010000
 12  0.00000000  0.00010000
 13  0.00000000  0.00010000
 14  0.00000000  0.00010000
 15  0.00000000  0.00010000
 16  0.00000000  0.00010000
 17  0.00000000  0.00010000
 18  0.00000000  0.00010000
 19  0.00000000  0.00010000
 20  0.00000000  0.00010000
 21  0.00000000  0.00010000
 22  0.00000000  0.00010000
 23  0.00000000  0.00010000
 24  0.00000000  0.00010000
 25  0.00000000  0.00010000
 26  0.00000000  0.00010000
 27  0.00000000  0.00010000
 28  0.00000000  0.00010000
 29  0.00000000  0.00010000
];

mmedinypq=[
  1  0.05252000  0.01460000
  2  0.12240000  0.01460000
  3 -0.40000000  0.01460000
  4 -0.10011100  0.01460000
  5 -0.40000000  0.01460000
  6 -0.06593000  0.01460000
  7  0.52089574  0.01460000
  8  0.00000000  0.00010000
  9  0.00000000  0.00010000
 10  0.00000000  0.00010000
 11  0.00000000  0.00010000
 12  0.00000000  0.00010000
 13  0.00000000  0.00010000
 14  0.00000000  0.00010000
 15  0.00000000  0.00010000
 16  0.00000000  0.00010000
 17  0.00000000  0.00010000
 18  0.00000000  0.00010000
 19  0.00000000  0.00010000
 20  0.00000000  0.00010000
 21  0.00000000  0.00010000
 22  0.00000000  0.00010000
 23  0.00000000  0.00010000
 24  0.00000000  0.00010000
 25  0.00000000  0.00010000
 26  0.00000000  0.00010000
 27  0.00000000  0.00010000
 28  0.00000000  0.00010000
 29  0.00000000  0.00010000
];
```

Ilustración 35: Ejemplo de introducción de medidas virtuales en los nudos ficticios.

Se destaca de estas nuevas medidas de inyección de P y Q que son medidas exactas por lo que el valor de la desviación típica debe ser el mínimo que el algoritmo de estimación de estado considere. En este caso 0.0001.

Como entrada de esta función se tiene:

- Fichero de la topología de la red original.
- Fichero de la topología de la red anterior.
- Fichero de medidas mínimas necesarias para el reparto de cargas.

Por su parte, la única salida que presenta esta función es el fichero de medidas para el reparto de cargas más las medidas virtuales ($P_i = 0$ y $Q_i = 0$).

4.3. Función 'Calc_temp_cond'

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, esta función permite obtener la temperatura de cada conductor en función de una serie de parámetros físicos y meteorológicos, que se consideran constantes, y un estado de carga determinado. (Ver apartado 3.3.9).

En esta función se requieren las siguientes entradas:

- Fichero de la red multisegmento.
- Fichero del conjunto completo de medidas de la red multisegmento.
- Fichero de longitudes de las líneas segmentadas.
- Fichero de los niveles de tensión de cada línea segmentada.
- Matriz de la temperatura ambiente de cada segmento.
- Fichero con el tipo de rama.
- Matriz con la temperatura del conductor en la iteración anterior.

Nota: En caso de tratarse de la primera iteración, esta última matriz tendrá asignada un valor de temperatura de conductor para cada segmento igual a 20°C.

La única salida de esta función es una matriz con la temperatura del conductor de cada segmento. En dicha matriz también se especifica el número de circuito y el tipo de rama.

4.3.1 Pasos de la función

En primer lugar, esta función se encarga de calcular la intensidad que circula por cada segmento a partir de las medidas de flujo obtenidas del reparto de cargas. Dichas intensidades se calculan de forma indirecta como:

$$I_{i,j} = \sqrt{P_{i,j}^2 + Q_{i,j}^2} / V_i \quad (33)$$

donde:

$I_{i,j}$: es la intensidad que circula por la línea i,j.

$P_{i,j}$: es la potencia activa que circula por la línea i,j.

$Q_{i,j}$: es la potencia reactiva que circula por la línea i,j.

V_i : es la tensión del nodo origen de la línea i,j.

Una vez calculadas las intensidades en pu. se identifican las resistencias en pu. dentro de la matriz de impedancia del fichero de red segmentada. Se requiere identificar la tensión base de cada una de cada línea y, tomando como potencia base 100 MVA, se calculan los valores de la intensidad y resistencia en amperios (A) y ohm (Ω) respectivamente. Las resistencias deben expresarse en ohm/m por lo que se divide cada resistencia por la longitud de cada línea correspondiente.

Se definen los parámetros físicos y ambientales tal y como se definieron en el apartado **3.3.9** y se pasa la temperatura ambiente a K.

Finalmente se aplica el modelo de cálculo de temperaturas del conductor expuesto en el apartado **3.3** para obtener la temperatura de todas las líneas.

Cabe destacar que esta función calcula la temperatura del conductor incluso para aquellas líneas que son transformadores. Dado que esto no tiene sentido, posteriormente se identifica qué rama es un transformador y según el nivel de tensión se corrige la temperatura del transformador aplicando el modelo de segundo orden correspondiente.

Nota: El procedimiento de cálculo de temperaturas de conductores se realiza de esta forma simplicidad a la hora de mantener dimensiones de la matriz de ramas y para evitar emplear funciones ‘find’ que prolonguen el proceso de cálculo de temperatura.

4.3.2 ¿Es necesario un proceso iterativo para el cálculo de las temperaturas de los conductores?

A priori, parece evidente que al calcular unas temperaturas de los conductores, con las medidas disponibles inicialmente, se modifican los valores de las resistencias y con ello los flujos por las líneas. Por tanto, ante esta variación de las medidas, se requiere volver a calcular las temperaturas de los conductores. Este proceso debería realizarse en bucle hasta que las temperaturas entre una iteración y la siguiente no difieran en más de 0.1°C.

Sin embargo, este proceso iterativo requeriría una mayor complejidad del algoritmo. En este apartado, mediante un ejemplo se comprueba que las temperaturas de los conductores obtenidas tras tres iteraciones presentan unos resultados de las mismas suficientemente buenos.

Tabla 25: Temperaturas de los conductores de la red IEEE4 en las iteraciones 2 y 3.

Nudo origen	Nudo destino	Circuito	Temperatura de conductores iteración 2 (°C)	Temperatura de conductores iteración 3 (°C)
1	15	0	93.199	93.253
15	2	0	93.3	93.358
1	16	0	91.302	91.364
16	5	0	90.887	90.893
2	17	0	48.626	48.658
17	3	0	45.986	45.994
2	18	0	42.715	42.728
18	4	0	42.675	42.689
2	19	0	43.746	43.769
19	5	0	42.636	42.655
3	20	0	24.713	24.716
20	4	0	27.695	27.699
4	21	0	33.447	33.451
21	5	0	32.273	32.277
4	7	0	62.07	62.067
4	9	0	35.931	35.931
5	6	0	113.41	113.41
6	22	0	18.953	18.954
22	11	0	19.196	19.197
6	23	0	21.653	21.654
23	12	0	25.061	25.063
6	24	0	25.14	25.143
24	13	0	28.26	28.265
7	8	0	36.663	36.662
7	9	0	59.525	59.53
9	25	0	29.951	29.953
25	10	0	29.951	29.953
9	26	0	31.153	31.158
26	14	0	29.46	29.465
10	27	0	26.853	26.853
27	11	0	23.918	23.918
12	28	0	30.12	30.12
28	13	0	29.875	29.875
13	29	0	30.107	30.108
29	14	0	28.407	28.408

Tal y como se observa en la *Tabla 25*, la diferencia entre las temperaturas de las iteraciones 2 y 3 es mínima. Sólo existe diferencia a partir de la tercera cifra decimal. Por tanto, se puede observar que con tres iteraciones, las temperaturas obtenidas son válidas. Incluso, podría finalizarse el proceso en la segunda iteración.

4.4. Función 'R_Tcond'

Tal y como se especificó anteriormente, esta función se encarga de modificar el valor de la resistencia de las líneas de la red segmentada según la ecuación:

$$R'_{cc\theta} = R'_{cc} \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_{R'_{cc}})] \quad (34)$$

siendo:

$R'_{cc\theta}$: la resistencia del conductor en corriente continua en Ω/m a la temperatura final θ .

R'_{cc} : la resistencia del conductor en corriente continua en Ω/m a la temperatura inicial $\theta_{R'_{cc}}$.

α : la variación de la resistencia con la temperatura en K^{-1} . Se considera que los conductores son de cobre, por tanto $\alpha = 3.9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

θ : la temperatura media del conductor en K.

$\theta_{R'_{cc}}$: la temperatura a la que se encuentra la resistencia en K.

Los ficheros de entrada de esta función son:

- Fichero de la red segmentada.
- Matriz de temperaturas de los conductores actual.
- Matriz de temperaturas de los conductores anterior.

Como salida presenta un fichero de red segmentada con las resistencias modificadas.

Nota: El valor de la resistencia se modifica aunque la rama sea una línea o un transformador.

4.5. Función 'Unir_segmentos_red'

Dicha función se encarga de volver a unificar los segmentos en los que se dividieron las líneas originales para volver a tener una red con la topología inicial. La única diferencia reside en el valor de la resistencia, el cual ha sido modificado de acuerdo con el valor de la temperatura del conductor de cada segmento.

Las entradas de esta función son:

- Fichero de la red original.
- Fichero de la red segmentada con las resistencias modificadas.
- Fichero con el orden de los nuevos nudos de cada rama original.
- Número de divisiones.

Mientras que la única salida que presenta esta función es un fichero de la topología de la red original con los valores de las resistencias modificados según la temperatura.

Para explicar mejor el funcionamiento de la misma se expone un ejemplo. Sea una línea formada por los nudos iniciales 1-2, la cual se segmenta en 3 divisiones, dando lugar a 2 nodos ficticios 3 y 4 (ver *Ilustración 36*). El valor de la resistencia en pu. de la línea original es de 0.0636, por lo que al segmentar la línea en 3 segmentos (1-3, 3-4 y 4-2) el valor de la resistencia de cada uno de ellos es 0.0212.

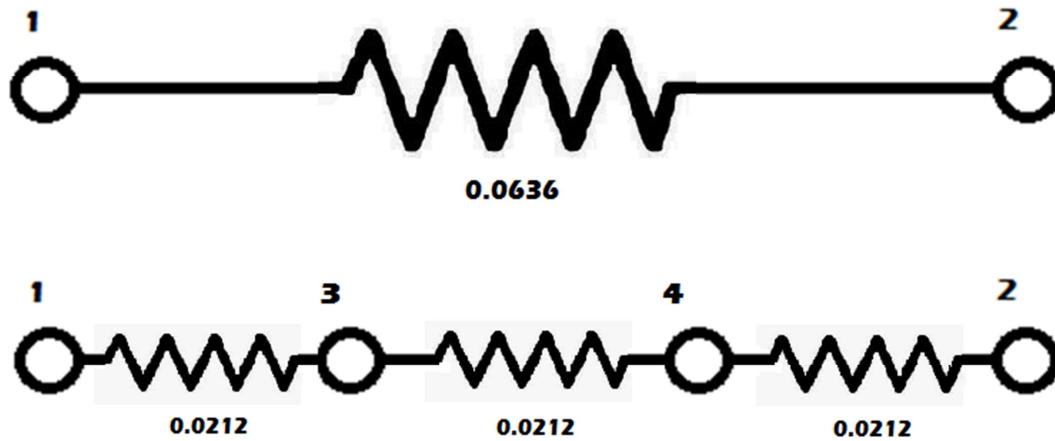


Ilustración 36: Segmentación de una resistencia.

Si, a continuación, cuando se calcula la temperatura de cada segmento se obtiene una temperatura de los tres igual a 25, 30 y 35°C, los valores de las mismas quedan modificados según la *ecuación 34*, suponiendo que inicialmente las resistencias estaban evaluadas a 20°C.

Nota: Las resistencias podrían encontrarse a otra temperatura distinta de 20°C como sería en el caso de las iteración2 y 3.



Ilustración 37: Modificación de los valores de cada resistencia con la temperatura del conductor.

Por tanto, si finalmente se unifican los segmentos, devolviendo la línea a la topología original, se obtiene el siguiente valor de la resistencia:



Ilustración 38: Resistencia de la línea ya modificada.

Finalmente, se ha obtenido la línea con un valor de resistencia muy próximo al valor que se obtendría realmente en la línea, teniendo en consideración la temperatura a la que se ve sometida el conductor. El procedimiento a seguir con las reactancias y susceptancias es el mismo, con la diferencia que estos parámetros no se ven afectados de forma significativa por la temperatura.

Esta misma filosofía será la que se aplique a todas las líneas que componen una red, obteniéndose así una red con la misma topología de la red original pero con un valor de resistencias más realista.

4.6. Función 'Selección_medidas'

Para llevar a cabo el objetivo de dicha función se requieren los siguientes parámetros y ficheros de entrada:

- Fichero de la red original.
- Fichero del conjunto completo de medidas de la red original.
- Fichero del conjunto completo de medidas de la red segmentada.
- Fichero con el orden de los nuevos nudos de cada rama original.
- Número de divisiones.

Como salida se dispone del fichero de medidas correspondiente a la red con la topología original pero valores acorde a los valores de resistencia modificada según la temperatura del conductor. Es decir, un conjunto completo de medidas para la red unificada y a la temperatura del conductor.

Tal y como se mencionó anteriormente, el objetivo de esta función es seleccionar del conjunto completo de medidas obtenido para la red multisegmento, un conjunto de medidas que se corresponda con la red original. Es decir, seleccionar los flujos de potencia activa y reactiva de los segmentos extremos, ya que estos se corresponden con los flujos de la red original.

Por otro lado, se debe seleccionar el conjunto tensiones correspondientes a los nudos de la red original, es decir, si una red está compuesta por 10 nudos y 15 ramas, y se añadieron 2 divisiones, el número de nudos ficticios añadidos es:

$$N_{\text{nudos ficticios}} = (N^{\circ} \text{ ramas} - N^{\circ} \text{ transformadores}) \cdot (Div - 1) \quad (35)$$

Por tanto, de la matriz de tensiones de nudos, habrá que seleccionar los 10 primeros nudos, los cuales se corresponden con los nudos de la red original, y su correspondiente valor de tensión y desviación típica.

De igual forma se debe proceder con las inyecciones de P y Q, seleccionando aquellas filas de la matriz que se correspondan con los nudos de la red original.

4.7. Función 'Calc_temp_ambiente'

Aunque esta función no aparece reflejada en el esquema de la *Ilustración 31*, tiene una gran importancia en los estudios realizados a posteriori. Ya que permite construir una matriz con las temperaturas ambientes de forma automática introduciendo una serie de parámetros. Además, se le otorga cierta versatilidad para poder simular la situación de que se considere la temperatura del conductor constante e igual al valor introducido en esta función.

Las entradas de esta función son:

- Fichero de red original.
- Un parámetro 'modo' que permite determinar el modo de actuar de la función.
- Un valor numérico que será el que se considera en caso de que la temperatura ambiente o del conductor sea constante para toda la red.
- Un parámetro 'estacion' que permita seleccionar el rango de variación aleatorio de la temperatura ambiente.

La salida de la función es una matriz con la temperatura ambiente de a la que se encuentra cada nodo.

A priori, el objetivo principal de la función es crear una matriz cuya primera columna corresponda con los nudos de la red y la segunda, la temperatura ambiente asignada. No obstante, según el valor del parámetro 'modo' se asigna de una forma u otra.

En primer lugar, si modo = 0, implica que la matriz se va a introducir manualmente creándose dicha matriz. Si por otro lado modo = 1, la matriz de temperaturas ambiente se crea automáticamente y con un valor constante para todos los nudos e igual al valor numérico, introducido en tercer lugar en la función.

Otro caso consiste en asignar modo = 2, lo cual considera que la temperatura ambiente de cada nodo se introduce aleatoriamente según un determinado rango. Para acotar de forma realista este rango se añade el parámetro 'estacion', cuál se corresponde con una estación del año determinada. Los valores de dicho parámetro y el rango de temperatura correspondiente se refleja en la *Tabla 26*.

Tabla 26: Tabla de rango de temperaturas según la estación del año.

Modo = 2	Parámetro 'estacion'	Estación del Año	Rango de Temperaturas (°C)
	0	No considera	0-45
	1	Primavera	15-25
	2	Verano	20-45
	3	Otoño	10-25
	4	Invierno	0-15

Finalmente, el último caso contemplado es modo=3, según el cual se fija la temperatura de todos los conductores igual al valor numérico introducido en tercer lugar como entrada de la función. Por tanto, si se procede de esta forma, no se requerirá calcular la temperatura del conductor en este modo, al estar ya determinada para cada línea y transformador. Sí se segmentará la red y se asociará a cada nudo ficticio una temperatura ambiente según lo establecido en el apartado **3.1**.

Este último modo es con el que se realizaron los ensayos del ‘Análisis Previo’ del apartado **2**. En el siguiente apartado se explicará por qué cuando la temperatura del conductor se fija a 20°C para todos los conductores existe un pequeño residuo normalizado distinto de cero. Cuando a priori, debería ser nulo.

5 VALIDACIÓN DEL MODELO Y ALGORITMO

En este apartado se describen una serie de verificaciones que se llevan a cabo para comprobar que el algoritmo presentado funciona correctamente y que no da lugar a estimación de estados erróneas. En primer lugar se llevan a cabo tres modelos de estimación de estado que, a priori, se sabe si se van a producir o no residuos normalizados distintos de cero.

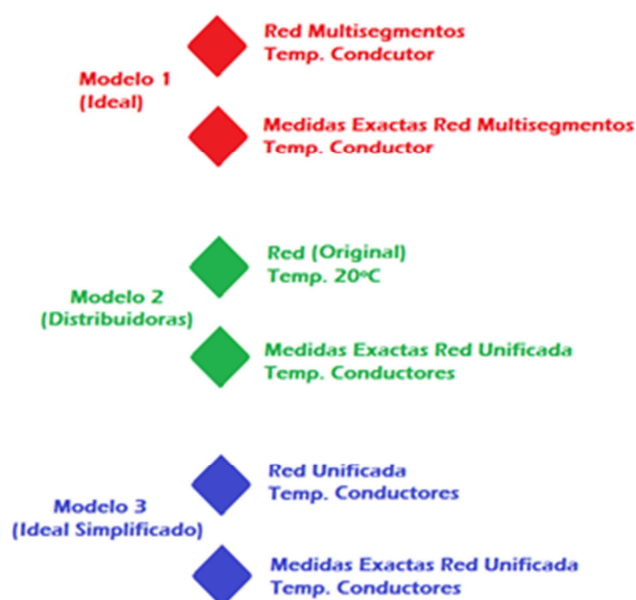


Ilustración 39: Modelos a ejecutar con el algoritmo.

En primer lugar, se destaca el modelo de estimación de estado 1, según la cual se plantea en este trabajo como un modelo ideal, es decir, una red multisegmento con las resistencias de cada uno de los segmentos en los que se divide la línea ajustadas al valor de la temperatura de conductor correspondiente. Las medidas empleadas para la estimación de estado son aquellas que se obtienen de un reparto de cargas. Las medidas empleadas en este último serán las mínimas necesarias para poder realizar el reparto de la red original añadiendo las medidas virtuales ($P_i = 0$ y $Q_i = 0$). Por tanto, cabe esperar que los residuos normalizados sean cero.

Nota: Esta situación es ficticia ya que se disponen de medidas para nudos ficticios, que no existen en la realidad. Además, también aparecen medidas en segmentos determinados por nudos en los que al menos uno no es real. Pese a ello, este modelo permite obtener una muy buena estimación de la temperatura a la que se ven sometidos los conductores de la red real.

Por otro lado, se plantea el modelo actual de estimación de estado que emplean las empresas distribuidoras de energía eléctrica. Esto es, una estimación de estado que emplea un modelo topológico de la red en la que las resistencias se evalúan a 20°C, y las medidas, las que realmente dictan los instrumentos de medidas pertinentes

en un estado de carga y temperatura real en el que se encuentre la red. Los residuos normalizados obtenidos de esta estimación de estado podrán ser distintos de cero, ya que las medidas distan en mayor o menor medida de las que se obtendrían si toda la red se encontrara en unas condiciones de carga y temperaturas tal que las resistencias del sistema estuviesen a 20°C.

Nota: Estas medidas son las que se obtienen tras hacer la selección de medidas del conjunto completo de medidas de la red multisegmento, la cual se comenta en el apartado 4.6.

Otro modelo que suscita interés para analizar, es el modelo 3, el cual simplifica el modelo 1 antes planteado. Este nuevo modelo plantea la estimación de estado de la red unificada (tras haber sido segmentada y modificado el valor de las resistencias, se devuelve a la topología original) pero los valores de las resistencias de las líneas se encuentran a la temperatura del conductor correspondiente. Las medidas empleadas son las mismas que las utilizadas en el modelo 2, las que realmente marcan los instrumentos de medidas estando la red en unas condiciones de carga y temperatura determinada.

Nota: Este modelo hace uso de la segmentación sólo para el cálculo de la temperatura de las líneas de forma exhaustiva. No aumenta el número de nudos y ramas para la estimación de estado.

Es por ello que, si las resistencias del modelo topológico de la red han sido ajustadas a la temperatura correspondiente, los residuos normalizados sean nulos. Ya que las medidas son tomadas tomando en consideración la ‘resistencia real’ de la red.

Nota: Se entiende por ‘resistencia real’ aquel valor de la misma que se encuentra en unas condiciones de carga y condiciones ambientales y de temperatura determinadas. Estas, no necesariamente dan lugar a que la temperatura a la que se encuentre la resistencia del conductor sea 20°C.

Finalmente, plantea una última comprobación. Se realiza una nueva selección de las medidas exactas obtenidas tras el proceso de selección de medidas. Las medidas seleccionadas serán las mismas que el algoritmo inicial toma como datos de partida para el reparto de carga inicial, ‘Medidas RC’. (Ver *Ilustración 31*). Si los valores de estas medidas son las mismas, esto significa que el modelo planteado no altera las medidas iniciales, y por tanto, se aplica correctamente.

5.1. Particularidades del Modelo 3

El principal inconveniente que supone emplear el modelo 1 para la estimación de estado a tiempo real de las redes del sistema eléctrico es la elevada dimensión que tienen los mismos. Por tanto, aplicar una nueva estimación de estado tal que el número de nudos sea aún más elevado, plantea un serio problema en cuanto a tiempo de obtención de resultados se refiere. La aplicación real del modelo 1 no es factible.

El modelo 3, a diferencia, lleva a cabo una estimación de estado con las mismas dimensiones (líneas y nudos) que la estimación de estado original, por tanto, sólo requiere el cálculo de las temperaturas de las resistencias aplicando el modelo de segmentación.

Además, emplear el modelo 1, implicaría manejar una mayor cantidad de información, ya que el número de líneas a evaluar aumenta con el número de divisiones de forma proporcional. Es decir, una red de 10 líneas, 8

nudos, donde el número de divisiones a plantear es 2 (el mínimo posible), el modelo 1 implica una transformación de la misma en una red de 18 nudos y 20 líneas. Lo que da lugar a que se requiera almacenar una mayor cantidad de información y consecuentemente, mayor espacio en memoria.

No obstante, el modelo 3 no requiere tanta información, ya que sólo necesita los flujos de potencia de las nuevas líneas para calcular las temperaturas de los conductores. Una vez se obtienen, sólo se requiere modificar las resistencias de las de las líneas, unificarlas y realizar la selección de medidas. Todo ello se realiza antes de aplicar la estimación de estado, y el tiempo empleado para la obtención de las temperaturas es del orden de segundos.

Por tanto, cabe esperar que la aplicación del modelo 3 en la estimación de estado presente una mejora con respecto a la que actualmente realizan las empresas de distribución. En el apartado 9 se presenta un modelo similar al 3 que plantea mejoras tanto en cuanto a estimación de estado se refiere sin aumentar el número de nudos y ramas de la red.

5.2. Diferencias topológicas entre la red original y red unificada

La red original presenta un modelo en pi como se muestra a continuación:

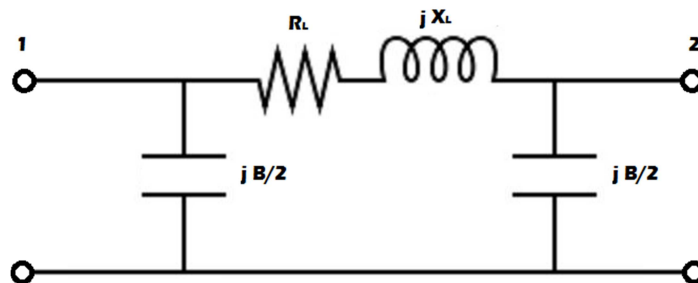


Ilustración 40: Modelo en pi de una línea.

Al segmentarse cada línea, el modelo en pi queda:

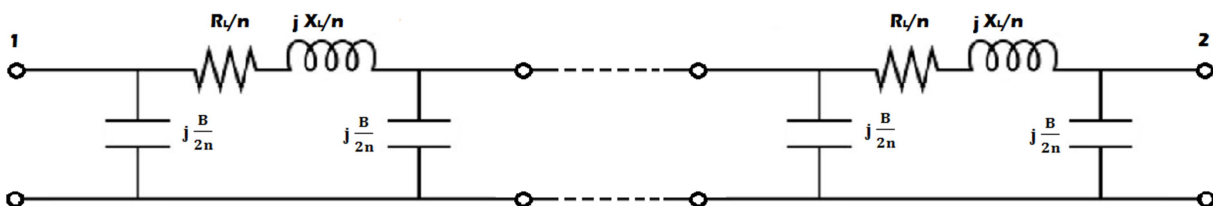


Ilustración 41: Modelo en pi de una línea multi-segmentada.

Por tanto, al obtenerse el conjunto completo de medidas, se están considerando varias susceptancias en paralelo, en vez de una en los extremos. Por tanto, existirá una pequeña diferencias en las medidas obtenidas, dando lugar a un residuo normalizado de valor pequeño cuando se realiza una estimación de estado tal que las condiciones de carga y temperatura hacen que las resistencias se evalúen a 20°C. (Ver estudios de apartado 2).

En los ensayos realizados se aprecia que cuanto mayor sea el valor de dicha susceptancia, mayor será el residuo normalizado que aparezca en la situación previamente descrita. Además, el número de divisiones también es significativo en el valor de los residuos normalizados; cuanto mayor es el número de divisiones, mayores son los residuos normalizados distintos de cero.

5.2.1 Red con/sin Elementos Shunt

En primer lugar, se presenta el efecto que tiene sobre la estimación de estado la presencia de susceptancias en paralelo en el modelo multisegmento cuando las condiciones de carga y de temperaturas son tales que las resistencias se evalúan a 20°C. Por lo que las medidas enviadas por los elementos de medición fueron tomadas cuando la red tenía una temperatura de los conductores igual a 20°C. En caso de aplicar la estimación de estado convencional (sin aplicar el nuevo modelo presentado en el presente trabajo), no se obtendrían residuos normalizados. Sin embargo, con el modelo de segmentación de la red sí se observa una pequeña diferencia.

Sea la red de la *Ilustración 42* la cual se analizará en las condiciones previamente descritas cuando las suceptancias tienen valor nulo y cuando estas no lo son.

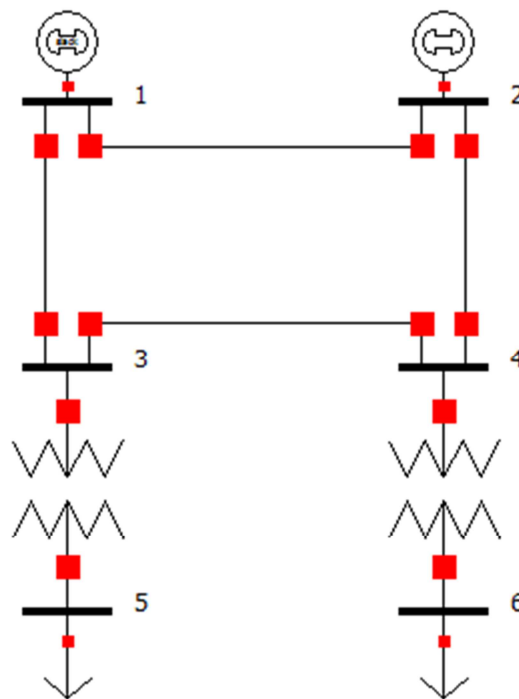


Ilustración 42: Red de 6 nudos y 6 ramas.

Los resultados obtenidos al aplicar el modelo multisegmento para 2, 3 y 4 divisiones se recogen en la *Tabla 27*.

Tabla 27: Comparación de los RN en una red sin elementos capacitivos en paralelos y con ellos, según el número de divisiones.

Red sin Shunt			Red con Shunt		
T_cond=20°C			T_cond=20°C		
Div=2			Div=2		
	Q4	0		P4	0,1
	Q6-4	0		Q4-2	0,1
	V6	0		Q4	0,1
	Q2-1	0		P4-2	0
	Q6-4	0		P4-3	0
	Q4-2	0		P3-1	0
Div=3			Div=3		
	Q4	0		P4	0,1
	Q6-4	0		Q4-2	0,1
	V6	0		Q4	0,1
	Q2-1	0		P4-2	0,1
	Q6-4	0		P4-3	0,1
	Q4-2	0		P3-1	0
Div=4			Div=4		
	Q4	0		P4	0,1
	Q6-4	0		Q4-2	0,1
	V6	0		Q4	0,1
	Q2-1	0		P4-2	0,1
	Q6-4	0		P4-3	0,1
	Q4-2	0		P3-1	0,1
Div=5			Div=5		
	Q4	0		P4	0,1
	Q6-4	0		Q4-2	0,1
	V6	0		Q4	0,1
	Q2-1	0		P4-2	0,1
	Q6-4	0		P4-3	0,1
	Q4-2	0		P3-1	0,1

Llama la atención como la red que no presenta elementos capacitivos en paralelo tiene, tal y como cabría esperar, valores de residuos normalizados nulos. Mientras que la red en la que dichos elementos capacitivos tienen un valor distinto de cero, se aprecia que los residuos normalizados son distintos de cero, y en su mayoría, próximos a 0.1.

También puede observarse un ligero aumento de dichos residuos conforme el número de divisiones aumenta, consecuencia de introducir un mayor número de elementos shunt. Aunque este efecto se refleja mejor en el siguiente ensayo.

5.2.2 Aumento del número de divisiones

A continuación se presenta ensayos de dos redes distintas donde se aumenta el número de divisiones, cuando la temperatura del conductor es 20°C (y por tanto, las resistencias se evalúan a este valor). Las medidas que aportan los instrumentos de medida estarán en unas condiciones de operación de la red tal que la temperatura de las líneas es 20°C. Debido a la diferencia entre el modelo multisegmento y el convencional, cabe esperar algunos valores de residuos normalizados no nulos.

Tabla 28: RN de la red IEEE24 con elementos capacitivos en paralelos según el número de divisiones.

IEEE24	T_cond=20°C		
	Div=2	RN	Err.r_N
	Q17-22	0,1	0,114170
	Q22-21	0,1	0,089274
	Q22-17	0,1	0,084039
	Q17	0,1	0,065497
	Q21-22	0,1	0,059452
	Q12-23	0,1	0,054105
Div=3		RN	Err.r_N
Q17-22	0,1	0,135260	
Q22-21	0,1	0,105760	
Q22-17	0,1	0,099552	
Q17	0,1	0,077594	
Q21-22	0,1	0,070427	
Q12-23	0,1	0,064094	
Div=4		RN	Err.r_N
Q17-22	0,1	0,142630	
Q22-21	0,1	0,111520	
Q22-17	0,1	0,104970	
Q17	0,1	0,081825	
Q21-22	0,1	0,074262	
Q12-23	0,1	0,067594	

En la *Tabla 28*, la primera columna indica el número de divisiones en que se divide la red, la segunda columna las medidas que presentan residuos normalizados, la tercera y cuarta columna los residuos normalizados de las medidas redondeando y sin redondear.

En primer lugar, se ensaya con la red IEEE24 (ver *Ilustración 7*). Al igual que en los ensayos de la red anterior, la red presenta valores de la susceptancia en paralelo del modelo en π distintos de cero, por lo que

aparecen residuos normalizados no nulos. Esto es debido a la diferencia topológica del modelo convencional y del modelo de segmentación.

En la *Tabla 28* se observa, además, una quinta columna, la cual muestra el valor de los residuos normalizados sin redondearlos. Por tanto, puede apreciarse con mayor nitidez como aumenta el valor de los residuos normalizados conforme el número de divisiones aumenta. Este aumento no es muy significativo.

Para comprobar cuan significativo puede llegar a ser esta diferencia de modelos, a continuación se presenta un ensayo con otra red donde el fenómeno es más notorio. Se aplica el mismo ensayo anterior a la red Kundur (ver *Ilustración 12*).

Tabla 29: RN de la red Kundur con elementos capacitivos en paralelos según el número de divisiones.

Kundur	T_cond=20°C		
	Div=2	RN	Err,r_N
	Q8	0,3	0,271280
	Q7	0,2	0,223940
	Q8-7,0	0,1	0,118950
	Q8-7,1	0,1	0,118930
	Q8-7,2	0,1	0,118920
	Q7-8,2	0,1	0,094012
	Div=3	RN	Err,r_N
	Q8	0,3	0,321120
	Q7	0,3	0,265030
	Q8-7,0	0,1	0,140800
	Q8-7,1	0,1	0,140790
	Q8-7,2	0,1	0,140770
	Q7-8,2	0,1	0,111260
	Div=4	RN	Err,r_N
	Q8	0,3	0,338530
	Q7	0,3	0,279390
	Q8-7,0	0,1	0,148440
	Q8-7,1	0,1	0,148420
	Q8-7,2	0,1	0,148400
	Q7-8,2	0,1	0,117290

En este caso, también se presentan los mismos fenómenos antes mencionados (ver *Tabla 29*). Los residuos normalizados son distintos de cero al ser los valores de las susceptancias no nulos. Y conforme aumenta el número de divisiones, también lo hacen los valores de los residuos, aunque este aumento no es muy significativo.

En este caso se destaca que los residuos normalizados debido a la diferencia topológica entre un modelo de estimación de estado y otro es algo mayor. Este mayor valor puede ser debido a que en esta red los valores de

las susceptancia son más elevados.

5.2.3 Valor de la susceptancia

A continuación se ensaya con una misma red en la que se aumenta el valor de las susceptancias. La red a considerar es la IEEE24.

Tabla 30: Comparación de los RN según el tamaño de la susceptancia en paralelo en la red IEEE24.

IEEE24									
T_cond=20°C	B_normal	RN	Err.r_N	B_x1,5	RN	Err,r_N	B_x2	RN	Err,r_N
Div=3	Q17-22	0,1	0,135260	Q17-22	0,3	0,27514	Q17-22	0,4	0,43716
	Q22-21	0,1	0,105760	Q22-21	0,2	0,18903	Q12-23	0,4	0,35153
	Q22-17	0,1	0,099552	Q12-23	0,2	0,18587	Q5-1	0,3	0,27279
	Q17	0,1	0,077594	Q17	0,1	0,12986	Q17-22	0,3	0,25691
	Q21-22	0,1	0,070427	Q22-17	0,1	0,1287	Q22-21	0,3	0,25408
	Q12-23	0,1	0,064094	Q21-22	0,1	0,12361	Q1-3	0,2	0,24618

En estos ensayos se presentan los residuos normalizados cuando la red se encuentra en unas condiciones de carga y temperaturas tales que la temperatura de los conductores es de 20°C. El modelo de segmentación se lleva a cabo con 3 divisiones.

En la primera columna de la *Tabla 30*, el valor de la susceptancia permanece sin alterar, en la segunda cuando se aumenta un 50% y en la tercera, un 100%. Se observa que al aumentar el valor de la susceptancia aumenta el valor de los residuos normalizados consecuencia de la diferencia topológica de los modelos.

Como consecuencia, y a la vista de los resultados obtenidos, al realizar los de cómo afecta la temperatura a la estimación de estado, habrá que considerar que un residuo en torno a 0.1-0.2 puede ser consecuencia de la diferencia del modelo.

6 ENSAYOS

En los siguientes apartados, se llevarán a cabo una serie de estimaciones de estado aplicando el modelo de segmentación y cálculo de temperatura explicado anteriormente. Dicha estimación de estado se lleva a cabo con la red tal que las resistencias se evalúan a 20°C y las medidas a la temperatura a la que se encuentran los conductores. Es decir, se simula la situación que actualmente llevan a cabo las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

Nota: En todos los apartados de siguientes todas las temperaturas están en °C.

6.1. Efecto de la Temperatura Ambiente

En esta apartado se analiza el efecto que tiene sobre la estimación de estado una variación de la temperatura ambiente. Es decir, al variar ésta, también lo hará la temperatura del conductor y, con ella, el valor de las resistencias de las líneas.

En los presentes ensayos se analizan tres redes: IEEE14 (*Ilustración 2*), IEEE24 (*Ilustración 7*) y la red Kundur_v2, la cual es la original y se le ha añadido una rama extra en el generador de la izquierda para poder transportar más potencia sin sobrecarga (*Ilustración 43*).

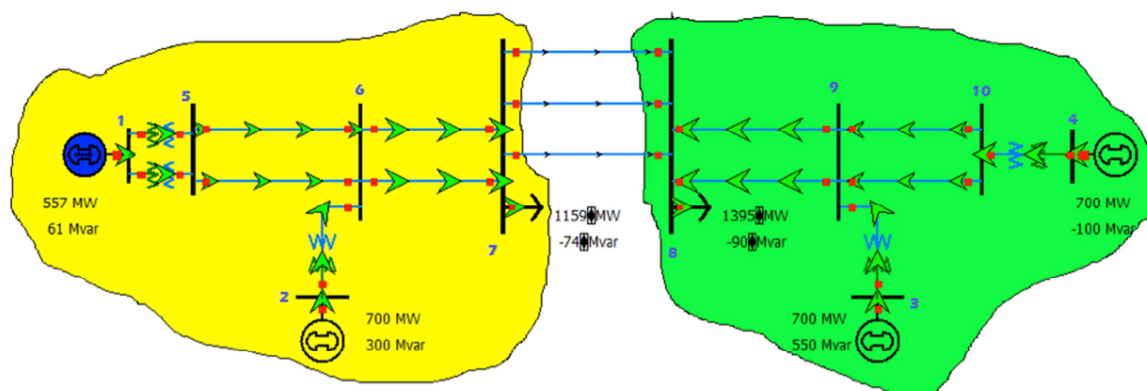


Ilustración 43: Red Kundur v2.

Finalmente, para llevar a cabo los ensayos, se supondrá que toda la red se haya a la misma temperatura ambiente.

6.1.1 Red IEEE14

En primer lugar, aplicando el modelo de segmentación antes expuesto, se somete la red a una temperatura ambiente de 0°C y progresivamente se va aumentando la misma hasta 15, 25 y 45°C. Dicha temperatura ambiente será constante para todos los nudos de la red. El número de segmentos en los que se divide cada línea es dos.

Tabla 31: RN según la temperatura ambiente de la red IEEE14.

IEEE14			
T_amb=0 °C		T_amb=15 °C	
	RN		RN
v1	1,1	v1	1,7
Q1-5	0,5	P2-1	0,4
Q5-1	0,5	Q1-5	0,4
Q1-5	0,3	Q1	0,4
Q5-2	0,3	P1	0,4
Q2-1	0,3	Q5-1	0,4
T_amb=25 °C		T_amb=45 °C	
	RN		RN
v1	2,1	v1	2,9
P2-1	0,5	v2	0,7
P1	0,4	v3	0,7
V3	0,4	P2-1	0,6
V2	0,4	v14	0,6
Q1	0,4	P1	0,5

Se observa en la *Tabla 31* cómo según aumenta la temperatura ambiente, también lo hace el valor de los residuos normalizados. Esto ocurre ya que la temperatura del conductor difiere de los 20°C que se considera en la resistencia, por tanto, en este caso, al aumentar dicha temperatura ambiente, también lo hace la diferencia entre la temperatura de las líneas y los 20°C. (Ver *Ilustración 44*).

Nota: Podría darse el caso que para un estado de cargas determinado y un campo de temperaturas ambiente tal que las temperaturas de las líneas sean 20°C.

En esta red, tras haber observado los resultados obtenidos de las estimaciones de estado, se aprecian valores de residuos normalizados de elevada magnitud. Estos valores son bastante significativos, ya que son medidas que, a priori, se consideran exactas, sin embargo, tienen un residuo normalizado elevado. Por tanto, esto puede dar lugar a pensar que no considerar la temperatura de los conductores en la estimación de estado puede dar lugar a errores importantes en la misma, llegando incluso a valores superiores a 2.

También es interesante destacar que las medidas con los residuos de mayor valor varían al cambiar la temperatura ambiente. Es decir, al aumentar la temperatura de 15°C a 25°C, las medidas que presentan mayor valor de los residuos normalizados no son las mismas.

A continuación, en la *Ilustración 44* y *45* se muestran las temperaturas de los conductores en cada uno de los casos expuestos:

T_amb=0°C				T_amb=15°C			
T_cond =				T_cond =			
1	15	0	70.996	1	15	0	85.858
15	2	0	70.699	15	2	0	85.565
1	16	0	69.913	1	16	0	85.047
16	5	0	70.013	16	5	0	85.162
2	17	0	27.796	2	17	0	42.779
17	3	0	27.837	17	3	0	42.825
2	18	0	19.067	2	18	0	33.872
18	4	0	19.031	18	4	0	33.835
2	19	0	21.361	2	19	0	36.163
19	5	0	21.407	19	5	0	36.208
3	20	0	9.9484	3	20	0	24.685
20	4	0	10.033	20	4	0	24.773
4	21	0	11.064	4	21	0	25.828
21	5	0	11.092	21	5	0	25.856
4	7	0	62.155	4	7	0	62.075
4	9	0	35.947	4	9	0	35.934
5	6	0	113.08	5	6	0	113.31
6	22	0	7.8782	6	22	0	22.614
22	11	0	7.8782	22	11	0	22.614
6	23	0	7.4104	6	23	0	22.129
23	12	0	7.4104	23	12	0	22.129
6	24	0	11.039	6	24	0	25.815
24	13	0	11.039	24	13	0	25.815
7	8	0	36.669	7	8	0	36.664
7	9	0	59.553	7	9	0	59.541
9	25	0	6.4147	9	25	0	21.123
25	10	0	6.4147	25	10	0	21.123
9	26	0	9.2855	9	26	0	24.038
26	14	0	9.2855	26	14	0	24.038
10	27	0	6.2503	10	27	0	20.963
27	11	0	6.2503	27	11	0	20.963
12	28	0	5.8586	12	28	0	20.557
28	13	0	5.8586	28	13	0	20.557
13	29	0	8.247	13	29	0	22.986
29	14	0	8.247	29	14	0	22.986

Ilustración 44: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE14 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.

T_amb=25°C				T_amb=45°C			
T_cond =				T_cond =			
1	15	0	90.799	1	15	0	115.42
15	2	0	90.507	15	2	0	115.13
1	16	0	90.081	1	16	0	115.18
16	5	0	90.2	16	5	0	115.32
2	17	0	47.771	2	17	0	72.706
17	3	0	47.818	17	3	0	72.76
2	18	0	38.806	2	18	0	63.465
18	4	0	38.769	18	4	0	63.426
2	19	0	41.095	2	19	0	65.738
19	5	0	41.139	19	5	0	65.778
3	20	0	29.6	3	20	0	54.193
20	4	0	29.689	20	4	0	54.287
4	21	0	30.752	4	21	0	55.387
21	5	0	30.78	21	5	0	55.414
4	7	0	62.048	4	7	0	61.919
4	9	0	35.93	4	9	0	35.909
5	6	0	113.38	5	6	0	113.75
6	22	0	27.53	6	22	0	52.135
22	11	0	27.53	22	11	0	52.135
6	23	0	27.04	6	23	0	51.62
23	12	0	27.04	23	12	0	51.62
6	24	0	30.742	6	24	0	55.397
24	13	0	30.742	24	13	0	55.397
7	8	0	36.663	7	8	0	36.655
7	9	0	59.537	7	9	0	59.524
9	25	0	26.031	9	25	0	50.601
25	10	0	26.031	25	10	0	50.601
9	26	0	28.959	9	26	0	53.587
26	14	0	28.959	26	14	0	53.587
10	27	0	25.872	10	27	0	50.449
27	11	0	25.872	27	11	0	50.449
12	28	0	25.462	12	28	0	50.016
28	13	0	25.462	28	13	0	50.016
13	29	0	27.903	13	29	0	52.512
29	14	0	27.903	29	14	0	52.512

Ilustración 45: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE14 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

6.1.2 Red IEEE24

A continuación se exponen los mismos casos que en el apartado anterior pero con la red IEEE24, con el fin de obtener los mismos resultados con una red de mayor dimensión.

Tabla 32: RN según la temperatura ambiente de la red IEEE24.

IEEE24			
T_amb=0°C		T_amb=15°C	
	RN		RN
Q13-23	1	Q16-15	1,1
Q23-13	0,9	Q15-16	1
Q16-15	0,9	Q13-23	0,9
Q15-16	0,8	Q23-13	0,9
Q3-4	0,8	Q16	0,8
Q19-16	0,7	Q19-16	0,8
T_amb=25°C		T_amb=45°C	
	RN		RN
Q16-15	1,2	Q16-15	1,5
Q15-16	1,2	Q15-16	1,5
Q13-23	0,9	v22	1,2
Q23-13	0,9	v21	1,2
Q16	0,9	v18	1,1
V22	0,8	Q16	1,1

De igual forma, conforme aumenta la temperatura ambiente, también aumentan los residuos normalizados ya que la diferencia de la temperatura de los conductores respecto a 20°C se acentúa (ver *Tabla 32*). Puede afirmarse que, de forma general, un aumento de la temperatura ambiente se traduce en un aumento de la temperatura del conductor, y con ello un aumento de los residuos normalizados. Aunque, como se comentó anteriormente, puede darse algún caso particular en el que las temperaturas ambiente y nivel de carga de lugar a unas temperaturas de conductores próximas a 20°C y los residuos normalizados disminuyan.

En este caso, también se aprecia cierta variación de las medidas con mayores residuos al aumentar la temperatura ambiente.

Se destaca de este caso que los residuos normalizados son, mucho más acentuados en cuanto a valor medio se refiere, ya que sin llegar a valores tan elevados, todos superan el valor de 0.5. Ello induce a pensar que el valor de las resistencias y el nivel de carga puedan influir considerablemente en la estimación de estado.

A continuación, en la *Ilustración 46* y *47* se muestran las temperaturas de los conductores en cada uno de los casos expuestos:

T_amb=0°C
T_cond =

1	25	0	6.3439
25	2	0	6.3437
3	26	0	28.438
26	1	0	28.968
1	27	0	9.19
27	5	0	9.067
2	28	0	7.7004
28	4	0	7.4288
2	29	0	9.205
29	6	0	8.6711
3	30	0	40.733
30	4	0	40.74
24	3	0	129.87
4	31	0	20.821
31	9	0	19.57
5	32	0	9.4489
32	10	0	9.4489
10	33	0	31.356
33	6	0	28.791
7	34	0	6.6837
34	8	0	6.6169
8	35	0	18.213
35	9	0	17.817
8	36	0	19.84
36	10	0	19.337
11	9	0	96.035
9	12	0	48.742
11	10	0	106.58
12	10	0	91.149
11	37	0	31.494
37	14	0	31.345
11	38	0	8.059
38	13	0	8.0425
12	39	0	11.902
39	13	0	11.874
12	40	0	26.534
40	23	0	26.081
23	41	0	16.395
41	13	0	16.727
14	42	0	39.449
42	16	0	39.274
15	43	0	59.526
43	24	0	60.407
15	44	0	7.9994
44	21	0	7.8992
15	45	1	7.9994
45	21	1	7.8992
16	46	0	7.6227
46	15	0	7.605
16	47	0	17.73
47	19	0	17.781
16	48	0	69.101
48	17	0	68.663
17	49	0	13.144
49	18	0	13.134
17	50	0	13.08
50	22	0	12.16
18	51	0	10.336
51	21	0	10.285
18	52	1	10.336
52	21	1	10.285
19	53	0	8.719
53	20	0	8.7816
19	54	1	8.719
54	20	1	8.7816
20	55	0	6.9143
55	23	0	6.9364
20	56	1	6.9143
56	23	1	6.9364
21	57	0	26.799
57	22	0	24.577

T_amb=15°C
T_cond =

1	25	0	21.013
25	2	0	21.013
3	26	0	42.805
26	1	0	43.381
1	27	0	23.982
27	5	0	23.853
2	28	0	22.466
28	4	0	22.177
2	29	0	23.995
29	6	0	23.449
3	30	0	55.009
30	4	0	55.022
24	3	0	129.87
4	31	0	35.891
31	9	0	34.615
5	32	0	24.144
32	10	0	24.144
10	33	0	45.558
33	6	0	43.019
7	34	0	21.34
34	8	0	21.273
8	35	0	32.872
35	9	0	32.474
8	36	0	34.494
36	10	0	33.992
11	9	0	96.02
9	12	0	48.732
11	10	0	106.39
12	10	0	90.98
11	37	0	45.906
37	14	0	45.752
11	38	0	22.669
38	13	0	22.652
12	39	0	26.495
39	13	0	26.465
12	40	0	41.016
40	23	0	40.556
23	41	0	30.954
41	13	0	31.292
14	42	0	53.746
42	16	0	53.569
15	43	0	73.29
43	24	0	74.172
15	44	0	22.609
44	21	0	22.508
15	45	1	22.609
45	21	1	22.508
16	46	0	22.235
46	15	0	22.217
16	47	0	32.272
47	19	0	32.323
16	48	0	82.755
48	17	0	82.319
17	49	0	27.726
49	18	0	27.717
17	50	0	27.669
50	22	0	26.747
18	51	0	24.933
51	21	0	24.882
18	52	1	24.933
52	21	1	24.882
19	53	0	23.322
53	20	0	23.386
19	54	1	23.322
54	20	1	23.386
20	55	0	21.527
55	23	0	21.55
20	56	1	21.527
56	23	1	21.55
21	57	0	41.292
57	22	0	39.068

Ilustración 46: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE24 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

T_amb=25°C				T_amb=45°C			
T_cond =				T_cond =			
1	25	0	30.806	1	25	0	50.423
25	2	0	30.806	25	2	0	50.423
3	26	0	52.381	3	26	0	71.532
26	1	0	52.986	26	1	0	72.192
1	27	0	33.855	1	27	0	53.622
27	5	0	33.722	27	5	0	53.482
2	28	0	32.324	2	28	0	52.07
28	4	0	32.024	28	4	0	51.75
2	29	0	33.865	2	29	0	53.626
29	6	0	33.312	29	6	0	53.06
3	30	0	64.512	3	30	0	83.492
30	4	0	64.529	30	4	0	83.518
24	3	0	129.87	24	3	0	129.87
4	31	0	45.93	4	31	0	65.984
31	9	0	44.638	31	9	0	64.666
5	32	0	33.951	5	32	0	53.585
32	10	0	33.951	32	10	0	53.585
10	33	0	55.022	10	33	0	73.948
33	6	0	52.503	33	6	0	71.473
7	34	0	31.124	7	34	0	50.721
34	8	0	31.057	34	8	0	50.654
8	35	0	42.646	8	35	0	62.194
35	9	0	42.246	35	9	0	61.794
8	36	0	44.262	8	36	0	63.796
36	10	0	43.761	36	10	0	63.299
11	9	0	96.011	11	9	0	95.995
9	12	0	48.725	9	12	0	48.713
11	10	0	106.27	11	10	0	106.03
12	10	0	90.869	12	10	0	90.65
11	37	0	55.507	11	37	0	74.697
37	14	0	55.351	37	14	0	74.535
11	38	0	32.424	11	38	0	51.964
38	13	0	32.406	38	13	0	51.946
12	39	0	36.233	12	39	0	55.732
39	13	0	36.203	39	13	0	55.7
12	40	0	50.667	12	40	0	69.963
40	23	0	50.202	40	23	0	69.489
23	41	0	40.666	23	41	0	60.102
41	13	0	41.007	41	13	0	60.447
14	42	0	63.265	14	42	0	82.283
42	16	0	63.087	42	16	0	82.104
15	43	0	82.453	15	43	0	100.76
43	24	0	83.334	43	24	0	101.64
15	44	0	32.364	15	44	0	51.904
44	21	0	32.262	44	21	0	51.802
15	45	1	32.364	15	45	1	51.904
45	21	1	32.262	45	21	1	51.802
16	46	0	31.992	16	46	0	51.538
46	15	0	31.974	46	15	0	51.519
16	47	0	41.971	16	47	0	61.378
47	19	0	42.022	47	19	0	61.43
16	48	0	91.843	16	48	0	110
48	17	0	91.409	48	17	0	109.57
17	49	0	37.456	17	49	0	56.935
49	18	0	37.447	49	18	0	56.926
17	50	0	37.403	17	50	0	56.891
50	22	0	36.48	50	22	0	55.969
18	51	0	34.675	18	51	0	54.187
51	21	0	34.625	51	21	0	54.136
18	52	1	34.675	18	52	1	54.187
52	21	1	34.625	52	21	1	54.136
19	53	0	33.071	19	53	0	52.598
53	20	0	33.135	53	20	0	52.664
19	54	1	33.071	19	54	1	52.598
54	20	1	33.135	54	20	1	52.664
20	55	0	31.285	20	55	0	50.834
55	23	0	31.308	55	23	0	50.858
20	56	1	31.285	20	56	1	50.834
56	23	1	31.308	56	23	1	50.858
21	57	0	50.949	21	57	0	70.254
57	22	0	48.726	57	22	0	68.039

Ilustración 47: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red IEEE24 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.

Nota: En la tabla se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.1.1).

Se observa en la *Ilustración 47* como al aumentar la temperatura ambiente, también lo hace la temperatura de las líneas.

6.1.3 Red Kundur_v2

En este apartado se somete la red Kundur_v2 (ver *Ilustración 43*) a los mismos ensayos que en los apartados anteriores.

Tabla 33: RN según la temperatura ambiente de la red Kundur_v2.

Kundur_v2			
T_amb=0 °C		T_amb=15 °C	
	RN		RN
Q7	0,2	Q8	0,3
Q8	0,2	Q7	0,2
V10	0,1	v1	0,2
V9	0,1	v3	0,1
Q7-8,2	0,1	v5	0,1
Q7-8,1	0,1	Q8-7,2	0,1
T_amb=25 °C		T_amb=45 °C	
	RN		RN
Q8	0,3	v18	0,6
v1	0,3	v5	0,5
v5	0,3	v4	0,4
v3	0,2	Q8	0,4
v4	0,2	v3	0,4
v6	0,2	V10	0,3

En la *Tabla 33* se observa el mismo fenómeno que en los ensayos anteriores. Se produce un aumento de los residuos normalizados al aumentar la temperatura ambiente. Esto es debido a que la diferencia de la temperatura del conductor con respecto a 20°C se acentúa al aumentar la temperatura ambiente. En este caso el fenómeno es menos pronunciado que en el caso anterior, llegando a un residuo máximo de 0.6.

Las temperaturas de las líneas a la que se encuentra la red son las que se muestran en la *Ilustración 48* y *49*.

T_amb=0°C				T_amb=15°C			
T_cond =				T_cond =			
1	5	0	70.696	1	5	0	70.401
1	5	1	70.696	1	5	1	70.401
5	11	0	10.303	5	11	0	24.899
11	6	0	10.206	11	6	0	24.802
5	12	1	10.303	5	12	1	24.899
12	6	1	10.206	12	6	1	24.802
2	6	0	89.509	2	6	0	89.509
6	13	0	7.1829	6	13	0	21.794
13	7	0	7.1801	13	7	0	21.791
6	14	1	7.1845	6	14	1	21.795
14	7	1	7.1817	14	7	1	21.793
7	15	0	10.115	7	15	0	24.732
15	8	0	10.628	15	8	0	25.256
7	16	1	10.116	7	16	1	24.733
16	8	1	10.63	16	8	1	25.257
7	17	2	10.117	7	17	2	24.734
17	8	2	10.631	17	8	2	25.259
8	18	0	8.7317	8	18	0	23.355
18	9	0	8.7507	18	9	0	23.374
8	19	1	8.7394	8	19	1	23.363
19	9	1	8.7585	19	9	1	23.382
3	9	0	124.05	3	9	0	124.31
9	20	0	7.8078	9	20	0	22.424
20	10	0	7.8303	20	10	0	22.447
9	21	1	7.8078	9	21	1	22.424
21	10	1	7.8303	21	10	1	22.447
4	10	0	72.432	4	10	0	72.539

Ilustración 48: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red Kundur_v2 cuando la temperatura ambiente es 0 y 15°C.

T_amb=25°C				T_amb=45°C			
T_cond =				T_cond =			
1	5	0	70.205	1	5	0	69.814
1	5	1	70.205	1	5	1	69.814
5	11	0	34.641	5	11	0	54.149
11	6	0	34.544	11	6	0	54.054
5	12	1	34.641	5	12	1	54.149
12	6	1	34.544	12	6	1	54.054
2	6	0	89.509	2	6	0	89.509
6	13	0	31.55	6	13	0	51.095
13	7	0	31.547	13	7	0	51.092
6	14	1	31.551	6	14	1	51.097
14	7	1	31.549	14	7	1	51.094
7	15	0	34.488	7	15	0	54.026
15	8	0	35.018	15	8	0	54.567
7	16	1	34.489	7	16	1	54.027
16	8	1	35.02	16	8	1	54.569
7	17	2	34.49	7	17	2	54.028
17	8	2	35.021	17	8	2	54.57
8	18	0	33.117	8	18	0	52.67
18	9	0	33.136	18	9	0	52.69
8	19	1	33.125	8	19	1	52.678
19	9	1	33.144	19	9	1	52.698
3	9	0	124.49	3	9	0	124.84
9	20	0	32.183	9	20	0	51.733
20	10	0	32.207	20	10	0	51.757
9	21	1	32.183	9	21	1	51.733
21	10	1	32.207	21	10	1	51.757
4	10	0	72.612	4	10	0	72.759

Ilustración 49: Comparación de las temperaturas de los conductores de la red Kundur_v2 cuando la temperatura ambiente es 25 y 45°C.

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

6.2. Efecto del Flujo PQ

En este apartado se plantea analizar cómo afecta al estudio que se está realizando el nivel de carga de la red y, en particular, el flujo de potencia activa y reactiva a la estimación de estado. A priori, cabe esperar que cuanto mayor sean estos flujos, mayor será la intensidad que recorre la línea y, consecuentemente, la temperatura del conductor aumentará. Por tanto, esto puede traducirse en mayores residuos normalizados conforme aumenta el nivel de carga de la red.

A continuación se planean dos escenarios en tres redes: uno en el que la red se encuentra poco cargada y otra en la que el nivel de carga es mucho mayor. A estas redes se le aplica la estimación de estado considerando una temperatura ambiente de 25°C en todos los nudos. Además, se divide la red en dos segmentos aplicando el modelo de segmentación (ver apartado 3.2). Las redes a evaluar son: Red 115 kV, Red 400 kV [4] y Red IEEE30 [1].

6.2.1 Red 115 kV

Esta red media tensión se corresponde con la de la *Ilustración 50*:

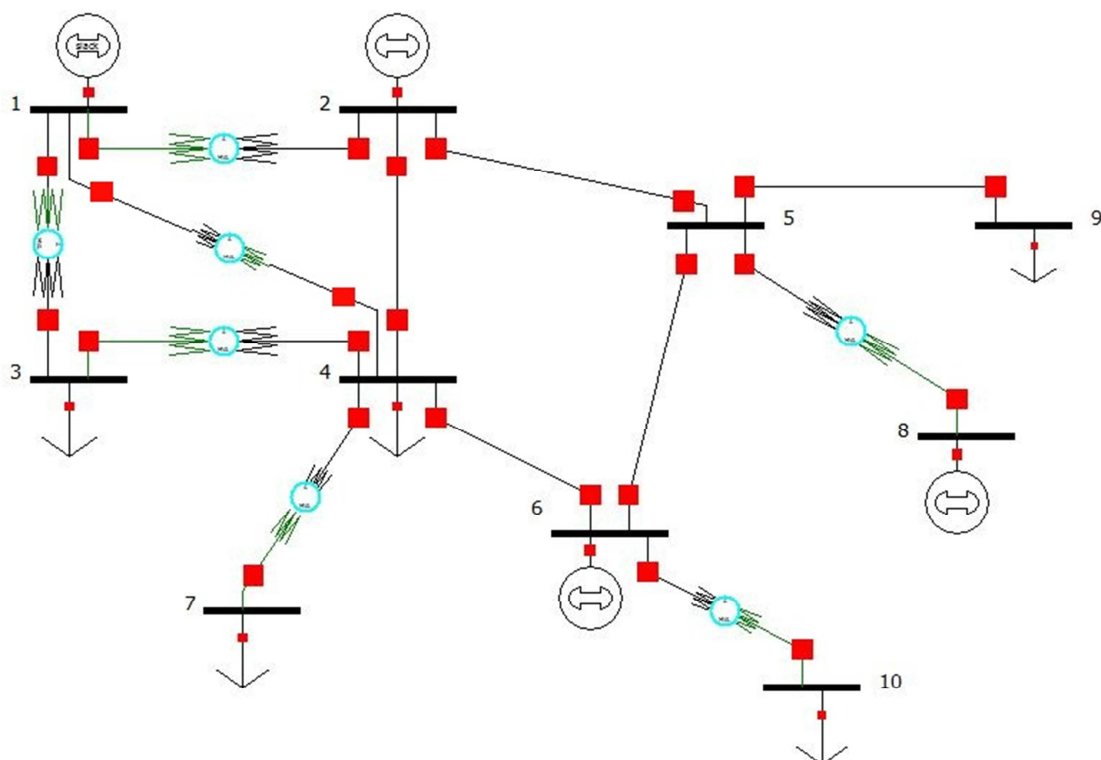


Ilustración 50: Red 115 kV.

Esta red se somete a un escenario descargado y otro cargado, en los cuales se obtienen los siguientes resultados tras realiza la estimación de estado.

Tabla 34: Diferencia de RN red 115 kV cargada y descargada.

Red Descargada		Red Cargada	
T ^a amb = 25°C		RN	
Q1-2	0,1	Q2-1	2,6
Q2-1	0,1	Q1-2	2,5
Q3-1	0	Q4-1	1,3
Q1-3	0	Q1-4	1,3
v2	0	Q1-3	1,3
Q3-4	0	Q3-1	1,3

Se observa en la *Tabla 34* que en el caso de la red con un bajo nivel de carga el valor de los residuos normalizados es prácticamente nulo. Sin embargo, cuando el escenario está más cargado, los residuos normalizados aumentan considerablemente su valor.

Esto se traduce en que al aumentar el nivel de carga (mayor flujo de potencia activa y reactiva), la intensidad que circula por las líneas es mayor, y con ello, la temperatura del conductor. Por tanto, la diferencia entre la temperatura a la que se evalúan las resistencias (20°C) y la temperatura a la que se encuentra la red cuando los instrumentos de medidas envían las mismas, es mayor, dando lugar a mayores residuos normalizados.

Red descargada				Red cargada			
T _{cond} =				T _{cond} =			
1	2	0	73.428	1	2	0	103.69
1	11	0	30.051	1	11	0	30.272
11	3	0	30.051	11	3	0	30.272
1	4	0	53.238	1	4	0	85.243
2	12	0	31.514	2	12	0	52.929
12	4	0	31.511	12	4	0	52.924
2	13	0	30.976	2	13	0	41.952
13	5	0	30.922	13	5	0	41.766
3	4	0	56.711	3	4	0	118.98
4	14	0	30.444	4	14	0	34.57
14	6	0	30.396	14	6	0	34.33
4	7	0	30.298	4	7	0	43.883
5	15	0	30.05	5	15	0	30.577
15	6	0	30.05	15	6	0	30.577
5	16	0	30.055	5	16	0	30.222
16	9	0	30.055	16	9	0	30.222
6	10	0	29.546	6	10	0	73.214
8	5	0	60.322	8	5	0	98.052

Ilustración 51: Diferencia de temperatura en red 115 kV cargada y descargada.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

Se puede observar como al aumentar el nivel de carga, la temperatura de algunas ramas aumenta con respecto al escenario no cargado.

6.2.2 Red 400 kV

De igual modo se plantean los mismos ensayos del apartado anterior para una red de alta tensión, como la de la siguiente *Ilustración 52*.

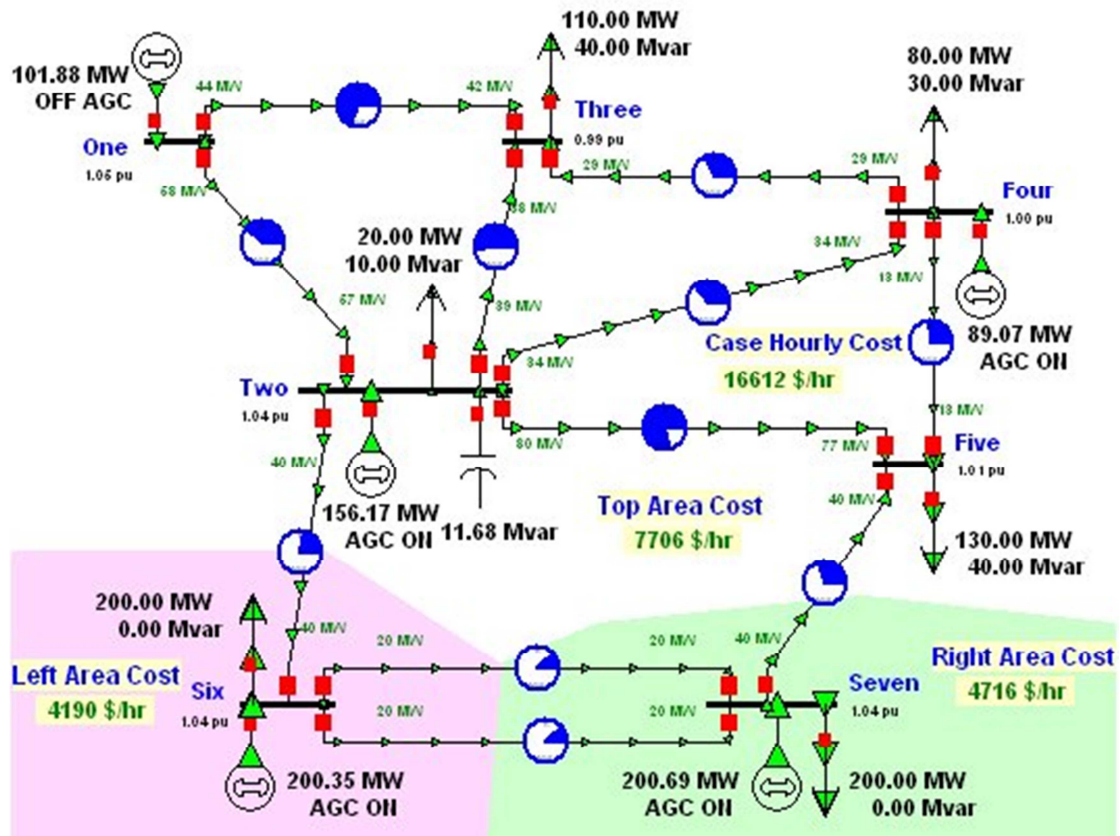


Ilustración 52: Red 400 kV.

Tras someter la red a un escenario descargado y cargado, los residuos obtenidos siguen el mismo patrón antes observado.

Tabla 35: Diferencia de RN red 400 kV cargada y descargada.

Red Descargada		Red Cargada	
T amb = 25°C		RN	
V1	0,3	Q7-5	3,3
V5	0,2	Q6-2	2,4
V2	0,1	V7	2,2
Q2-5	0,1	Q2-6	2,1
V7	0,1	Q5-7	2
Q5-2	0,1	Q7-6	1,9

En la *Tabla 35* se aprecia que, cuando la red se encuentra con un nivel de carga bajo, los residuos normalizados obtenidos son algo mayores que en el caso anterior, aunque siguen sin ser significativos. Al aumentar el nivel de carga, los residuos normalizados también lo hacen considerablemente, llegando incluso a sobrepasar el límite de medida errónea ($RN \geq 3$). Además, muchas medidas empiezan a tener residuos de valor importante.

Red descargada				Red cargada			
T_cond =				T_cond =			
1	8	0	33.043	1	8	0	36.008
8	2	0	33.031	8	2	0	35.913
1	9	0	34.653	1	9	0	52.358
9	3	0	34.753	9	3	0	52.617
2	10	0	34.249	2	10	0	60.618
10	3	0	34.366	10	3	0	60.945
2	11	0	32.361	2	11	0	46.724
11	4	0	32.414	11	4	0	46.903
2	12	0	35.547	2	12	0	33.955
12	5	0	35.554	12	5	0	33.844
2	13	0	31.937	2	13	0	33.81
13	6	0	31.902	13	6	0	33.68
3	14	0	31.429	3	14	0	31.182
14	4	0	31.423	14	4	0	31.178
4	15	0	31.983	4	15	0	61.206
15	5	0	31.861	15	5	0	60.636
5	16	0	33.282	5	16	0	90.908
16	7	0	33.176	16	7	0	90.527
6	17	0	31.759	6	17	0	42.252
17	7	0	31.704	17	7	0	41.869
6	18	1	31.759	6	18	1	42.252
18	7	1	31.704	18	7	1	41.869

Ilustración 53: Diferencia de temperatura en red 400 kV cargada y descargada.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

Al igual que en el apartado anterior, las temperaturas de los conductores aumentan su valor al aumentar el nivel de carga. Nótese que no todos los conductores aumentan la temperatura por igual. Las líneas con mayor flujo de potencia tendrán mayor temperatura ya que la temperatura ambiente es constante.

6.2.3 Red IEEE30

Finalmente, se ensaya con la red IEEE30 [1] que se muestra en la *Ilustración 54*:

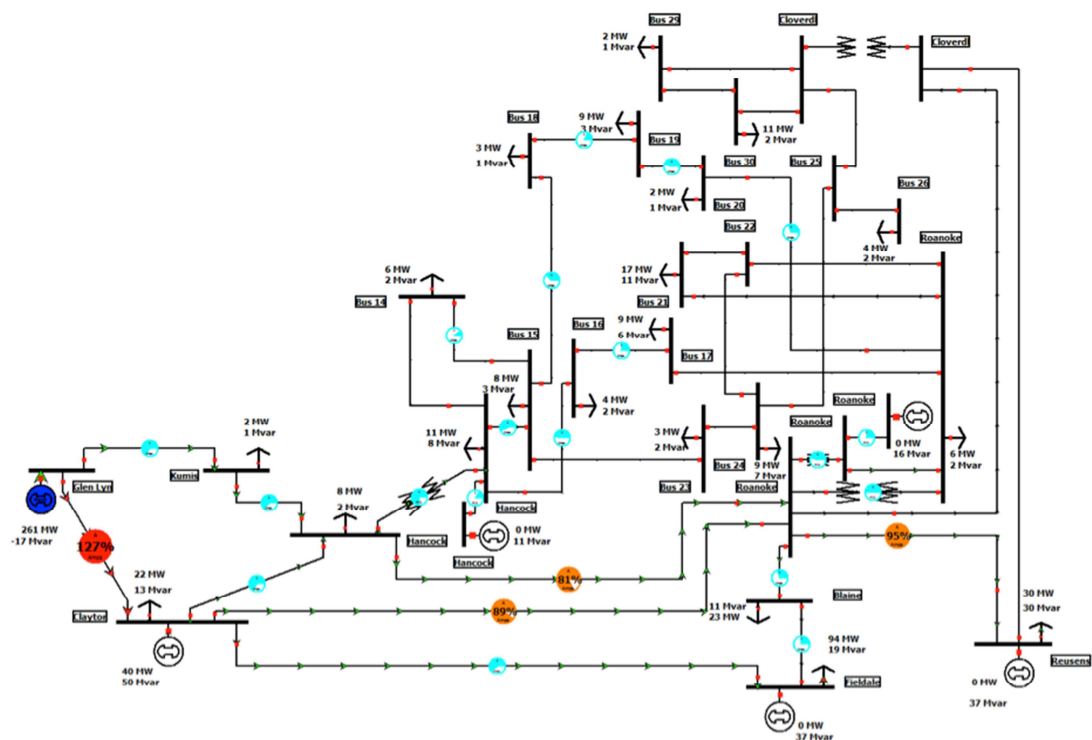


Ilustración 54: Red IEEE30.

De igual forma, se somete la red a dos escenarios, uno descargado y otro cargado. Los residuos obtenidos cumplen lo comentado en los apartados previos. Un aumento del nivel de carga se traduce un aumento de la temperatura del conductor y con ello aumentan los residuos normalizados.

Tabla 36: Diferencia de RN red IEEE30 cargada y descargada.

Red Medio Cargada		Red Cargada	
T amb = 25°C	RN		RN
Q11-12	1,7	Q11-12	2,4
Q12-11	1,6	Q12-11	2,3
Q11-7	1,5	Q11-7	2,1
Q10-12	1	Q10-12	1,5
Q12-10	1	Q12-10	1,5
Q11-10	1	Q11-10	1,5

Si se observa la *Tabla 36* en esta situación, donde el nivel de carga no es tan pequeño como en los casos anteriores, los residuos normalizados son más significativos. Lo que deja claro que en condiciones normales de explotación o nivel de carga elevado, la temperatura de los conductores juega un papel importante en la estimación de estado. Sin embargo cuando el nivel de carga es bajo, es decir, la red no transporta mucha potencia, el fenómeno de la temperatura es menos pronunciado.

Si se observan las temperaturas en la siguiente ilustración, las temperaturas de la red en estado cargado son mayores que cuando la misma actúa en condiciones normales de explotación.

Red descargada				Red cargada			
T_cond =				T_cond =			
1	31	0	64.848	1	31	0	50.556
31	2	0	64.281	31	2	0	50.273
1	32	0	61.105	1	32	0	69.101
32	3	0	61.257	32	3	0	70.067
2	33	0	48.835	2	33	0	40.633
33	5	0	48.881	33	5	0	40.696
2	34	0	40.649	2	34	0	51.096
34	7	0	41.05	34	7	0	52.065
2	35	0	36.986	2	35	0	39.458
35	9	0	37.097	35	9	0	39.751
3	36	0	36.738	3	36	0	34.774
36	7	0	36.745	36	7	0	34.791
4	11	0	45.49	4	11	0	45.49
5	37	0	40.67	5	37	0	37.68
37	8	0	41.121	37	8	0	38.376
6	38	0	31.36	6	38	0	30.805
38	9	0	31.369	38	9	0	30.813
6	29	0	25.073	6	29	0	25.168
7	39	0	33.192	7	39	0	31.745
39	9	0	33.191	39	9	0	31.744
7	11	0	32.145	7	11	0	38.001
8	40	0	77.778	8	40	0	48.753
40	9	0	77.96	40	9	0	48.888
9	26	0	28.417	9	26	0	32.34
9	28	0	26.521	9	28	0	30.316
9	29	0	36.785	9	29	0	42.476
10	41	0	37.417	10	41	0	39.837
41	11	0	37.417	41	11	0	39.837
10	42	0	31.72	10	42	0	32.202
42	12	0	31.72	42	12	0	32.202
11	43	0	70.131	11	43	0	83.019
43	12	0	70.131	43	12	0	83.019
11	44	0	39.864	11	44	0	42.598
44	13	0	39.864	44	13	0	42.598
12	45	0	35.404	12	45	0	38.58
45	14	0	35.404	45	14	0	38.58
12	46	0	34.022	12	46	0	34.78
46	21	0	34.022	46	21	0	34.78
13	47	0	33.613	13	47	0	34.958
47	20	0	33.613	47	20	0	34.958
14	48	0	33.023	14	48	0	35.518
48	15	0	33.023	48	15	0	35.518
15	49	0	31.23	15	49	0	30.738
49	18	0	31.23	49	18	0	30.738
16	50	0	43.534	16	50	0	30.685
50	17	0	43.534	50	17	0	30.685
16	51	0	42.36	16	51	0	59.852
51	22	0	42.36	51	22	0	59.852
17	52	0	60.211	17	52	0	74.077
52	22	0	60.211	52	22	0	74.077
18	53	0	31.034	18	53	0	34.578
53	26	0	31.034	53	26	0	34.578
19	54	0	30.085	19	54	0	30.127
54	25	0	30.085	54	25	0	30.127
19	55	0	35.301	19	55	0	37.222
55	26	0	35.301	55	26	0	37.222
20	56	0	30.605	20	56	0	30.667
56	26	0	30.605	56	26	0	30.667
21	57	0	44.171	21	57	0	47.659
57	27	0	44.171	57	27	0	47.659
22	58	0	35.537	22	58	0	38.85
58	23	0	35.537	58	23	0	38.85
22	59	0	30.044	22	59	0	30.044
59	29	0	30.044	59	29	0	30.044
23	60	0	41.537	23	60	0	58.571
60	24	0	41.537	60	24	0	58.571
23	61	0	31.467	23	61	0	31.56
61	27	0	31.467	61	27	0	31.56
25	62	0	33.727	25	62	0	35.02
62	26	0	33.727	62	26	0	35.02
25	63	0	34.063	25	63	0	35.067
63	27	0	34.063	63	27	0	35.067
28	26	0	84.818	28	26	0	113.76
28	30	0	75.689	28	30	0	80.313

Ilustración 55: Diferencia de temperatura en red IEEE30 cargada y descargada.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

6.3. Efecto de la Resistencia según la Temperatura del conductor

Otro parámetro significativo en la estimación de estado planteada, es el valor que tiene la resistencia. Esto es, un incremento en la temperatura del conductor se traduce en un aumento del valor de las resistencias, y por tanto, las medidas que aportan los instrumentos de medición distarán de las medidas calculadas por reparto de cargas realizadas cuando la red se encuentra a una temperatura de 20°C.

Si la resistencia tiene un valor mucho más elevado, esto se traduce en una mayor variación de las medidas aportadas. Ya que ante una variación de la resistencia, de un 20% por ejemplo, da lugar a mayores diferencias de valores resistivos si estas son más elevadas que si son de valores más pequeños. Con el fin de esclarecer esto, se expone un ejemplo.

Sean dos resistencias de valores 0.06 pu. y 0.02 pu. En una determinada situación, las condiciones de temperatura ambiente y carga dan lugar a una temperatura de los conductores tal que, se produce un aumento de las resistencias de las líneas de un 25%. Por tanto, las resistencias presentan unos nuevos valores de 0.075 pu. y 0.025 pu. Si se analiza, a continuación, el incremento que se ha producido en los valores de cada resistencia:

$$\Delta R_1 = 0.015 \quad (36)$$

$$\Delta R_2 = 0.005 \quad (37)$$

A priori, cabría esperar una mayor diferencia de las medidas cuando las resistencias están a la temperatura del conductor con respecto a cuándo están a 20°C si las resistencias son más grandes, que cuando son de valores más reducidos.

En los siguientes apartados, se ensayan tres redes: IEEE14 (ver *Ilustración 2*), IEEE24 (ver *Ilustración 7*) y Kundur (ver *Ilustración 12*). En cada una se presentan tres escenarios, uno en el que los valores de las resistencias se encuentran inalterados (tal cual los presenta el IEEE), otro en el que los mismos valores se aumentan un 50% y un último en el que se ascienden los valores al doble.

Para cada uno de los escenarios se supondrá una temperatura de los conductores constante para todas las líneas. En apartados posteriores se plantearán los mismos ensayos desde una perspectiva más realista, es decir, suponiendo constante una temperatura ambiente para todos los nudos.

Nota: En el primer caso, al fijar la temperatura del conductor, sólo se pretende conocer como de significativo puede ser el efecto del valor del parámetro resistivo, mientras que, con el segundo caso, conocer la importancia del mismo en situaciones que pudieran ocurrir en la realidad.

Por otra parte, el estado de carga de la red es el mismo para los tres escenarios de distintos valores de las resistencias y el número de segmentos en los que se dividen las líneas de la red es dos.

6.3.1 Red IEEE14

Tabla 37: RN de la red IEEE14 según la temperatura del conductor y valor de resistencia.

IEEE14					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_cond=20°C					
	RN		RN		RN
P5-1	0	v1	0	v1	0
P1-5	0	P5-1	0	P5-1	0
v1	0	P1-5	0	P1-5	0
Q3	0	Q5-1	0	v2	0
P2-5	0	v2	0	Q1-5	0
P1-2	0	Q3	0	Q5-1	0
T_cond=50°C					
	RN		RN		RN
v1	1,1	v1	1,7	v1	2,3
v2	0,5	v2	0,7	v2	1
v3	0,4	v3	0,6	v3	0,8
v14	0,4	v14	0,6	v14	0,8
Q1-2	0,3	Q1-2	0,4	Q2	0,5
Q5-1	0,3	Q2	0,4	Q1-2	0,5
T_cond=70°C					
	RN		RN		RN
v1	1,9	v1	2,9	v1	2,9
v2	0,8	v2	1,3	v2	1,7
v3	0,7	v3	1	v3	1,4
v14	0,6	v14	1	v14	1,4
Q1-2	0,5	Q1-2	0,7	Q2	0,9
P6-5	0,5	Q2	0,6	Q1-2	0,9
T_cond=90°C					
	RN		RN		RN
v1	2,6	v1	4,1	v1	5,6
v2	1,2	v2	1,8	v2	2,4
v3	0,9	v3	1,4	v3	2
v14	0,9	v14	1,4	v14	2
Q1-2	0,7	Q1-2	1	Q2	1,3
Q2-4	0,7	Q2	0,9	Q1-2	1,2

La primera columna de la *Tabla 37* muestra la red con los valores normales de las resistencias cuando se realiza la estimación de estado y la temperatura de los conductores es 20, 50, 70 y 90°C. En la siguiente columna las resistencias se aumentan un 50% y en la tercera, un 100%.

En primer lugar, cuando la temperatura de los conductores es 20°C, los valores de los residuos normalizados son nulos, independientemente de tamaño de la resistencia. En este caso, no se aprecia efecto de la susceptancia paralelo.

A medida que aumenta la temperatura del conductor (en una misma columna), los valores de los residuos normalizados aumentan, ya que los valores de las resistencias, que se evalúan a la temperatura indicada, dan lugar a medidas que distan en mayor medida de las que se obtendrían si las resistencias se evalúan a 20°C. Tal y como se observaba en los ensayos del apartado 2.1.

Si se observa cada una de las filas, para una misma temperatura del conductor, un valor de resistencias más elevado da lugar a mayores residuos normalizados, ya que como se comentó anteriormente, existe una mayor diferencia de las medidas cuando las resistencias están a la temperatura del conductor con respecto a cuándo están a 20°C si las resistencias son más grandes, que cuando son de valores más reducidos.

Se destaca un caso extremo, en el que las resistencias son el doble del valor de la resistencia normal, donde además, la temperatura del conductor es 90°C. En esta situación los residuos normalizados llegan a valores muy elevados (5.6). El resto de residuos, aunque no son tan elevados, superan la unidad. Por tanto se están considerando exactas muchas medidas que tienen valores elevados de residuos normalizados.

6.3.2 Red IEEE24

Tabla 38: RN de la red IEEE24 según la temperatura del conductor y valor de resistencia.

IEEE24					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_cond=20°C					
	RN		RN		RN
Q17-22	0,1	Q17-22	0,1	Q17-22	0,1
Q22-21	0,1	Q22-21	0,1	Q22-21	0,1
Q22-17	0,1	Q22-17	0,1	Q22-17	0,1
Q17-22	0,1	Q17-22	0,1	Q17-22	0,1
Q21-22	0,1	Q21-22	0,1	Q21-22	0,1
P12-23	0,1	P12-23	0,1	P12-23	0,1
T_cond=50°C					
	RN		RN		RN
v22	0,6	v22	0,9	v22	1,2
v21	0,6	v8	0,9	v8	1,2

v8	0,6	v21	0,9	v7	1,1
v7	0,6	v7	0,9	v21	1,1
v18	0,5	v18	0,8	Q16-15	1
Q16-15	0,5	Q16-15	0,8	Q15-16	1

T_cond=70°C

	RN		RN		RN
v22	1,1	v22	1,6	v22	2
v21	1	v8	1,5	v8	1,9
v8	1	v21	1,5	v7	1,9
v7	1	v7	1,4	v21	1,9
v18	0,9	v18	1,3	Q16-15	1,7
Q16-15	0,9	Q16-15	1,3	Q15-16	1,7

T_cond=90°C

	RN		RN		RN
v22	1,5	v22	2,2	v22	2,8
v8	1,4	v8	2,1	v8	2,7
v21	1,4	v7	2	v7	2,7
v7	1,3	v21	2	v21	2,6
v18	1,3	v18	1,8	Q16-15	2,4
Q16-15	1,2	Q16-15	1,8	Q15-16	2,4

Al igual que en el apartado anterior, ante un aumento de la temperatura de los conductores, los residuos normalizados aumentan. También, se produce un aumento de los residuos normalizados conforme aumenta el valor de las resistencias. En este ensayo, los residuos normalizados no son tan elevados como en el caso anterior (ver *Tabla 38*).

En este caso, cuando la temperatura de los conductores es 20°C, si se aprecia el efecto de la susceptancia en paralelo.

6.3.3 Red Kundur

Finalmente, se realiza el mismo ensayo con la red Kundur, obteniéndose los resultados que se muestran en la *Tabla 39*.

Tabla 39: RN de la red Kundur según la temperatura del conductor y valor de resistencia.

Kundur					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_cond=20°C					
	RN		RN		RN
Q8	0,3	Q8	0	Q8	0
Q7	0,2	Q7	0	Q7	0
Q8-7,0	0,1	Q6	0	Q6	0
Q8-7,1	0,1	Q9	0	Q9	0
Q8-7,2	0,1	Q8-7,0	0	P7	0
Q7-8,2	0,1	Q8-7,1	0	Q5	0
T_cond=50°C					
	RN		RN		RN
v1	0,5	v1	0,7	v1	0,9
v5	0,4	v5	0,6	v5	0,7
Q8	0,4	v4	0,5	v4	0,7
v4	0,4	v10	0,5	v10	0,6
v10	0,3	v3	0,4	v3	0,5
v6	0,3	v9	0,4	v9	0,5
T_cond=70°C					
	RN		RN		RN
v1	0,8	v1	1,1	v1	1,4
v5	0,7	v5	0,9	v5	1,2
v4	0,6	v4	0,9	v4	1,2
v10	0,5	v10	0,8	v10	1,1
Q8	0,5	v3	0,7	v3	0,9
v3	0,5	v9	0,6	v9	0,8
T_cond=90°C					
	RN		RN		RN
v1	1	v1	1,5	v1	2
v5	1	v5	1,3	v5	1,7
v4	0,8	v4	1,3	v4	1,7
v10	0,8	v10	1,1	v10	1,5
v3	0,6	v3	1	v3	1,3
v8	0,6	v9	0,8	v9	1,1

En este último ensayo, los fenómenos antes comentados se vuelven a repetir, aunque de forma menos pronunciada. A mayor temperatura de los conductores, mayores residuos normalizados. Y por otro lado, cuanto mayor es el valor de las resistencias, mayor sensibilidad de las resistencias al no considerar la temperatura de los conductores en la estimación de estado. Por tanto, dará lugar a mayores residuos normalizados (ver *Tabla 39*).

6.4. Efecto de la Resistencia según la Temperatura Ambiente

En este apartado, continuando con lo expuesto en el anterior, se procede a variar la temperatura ambiente de todos los nudos de las redes ensayadas, a la vez que se aumenta el valor de las resistencias en un 50% y en un 100%. De forma que se analice como afecta el valor de las resistencias a la estimación de estado en un ambiente donde las temperaturas son bajas, suaves o altas. Las temperaturas ambiente a ensayar son 0, 15, 30 y 45°C.

Por otra parte, el estado de carga de la red es el mismo para los tres escenarios de distintos valores de las resistencias y el número de segmentos en los que se dividen las líneas de la red es dos.

En los siguientes ensayos, las redes a ensayar son: IEEE14_v1 (ver *Ilustración 56*), IEEE24_v2 (ver *Ilustración 58*) y Kundur_v2 (ver *Ilustración 43*).

Nota: La red IEEE14_v1 y IEEE24_v2 es una modificación de la red original a la que se le han añadido alguna rama en paralelo para soportar un estado de carga algo más elevado, de forma que los conductores no alcancen temperaturas excesivamente altas.

6.4.1 Red IEEE14_v1

La red a ensayar se presenta en la *Ilustración 56*:

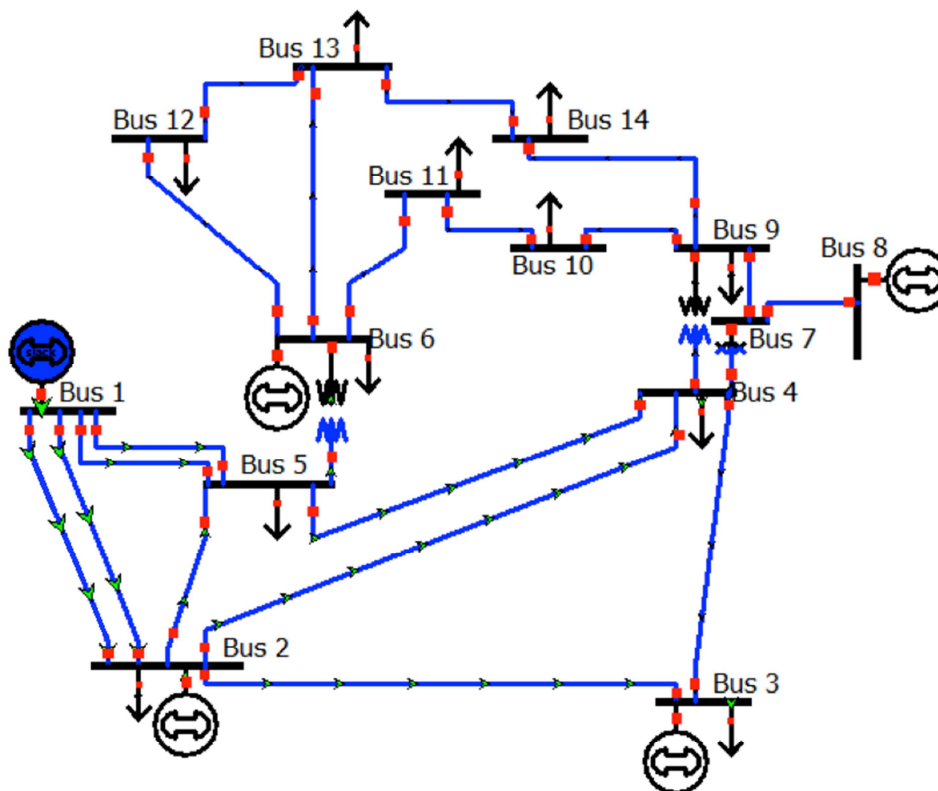


Ilustración 56: Red IEEE14_v1.

Tras haber realizado las distintas estimaciones de estado teniendo en cuenta las temperaturas ambiente de los nudos de la red, en la *Tabla 40* los residuos normalizados obtenidos según el tamaño de las resistencias.

Tabla 40: RN de la red IEEE14_v1 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.

IEEE14_v1					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_amb=0°C					
	RN		RN		RN
Q2-3	0,2	Q2-3	0,6	Q2-3	1,2
Q2-5	0,2	Q2-5	0,6	Q2-5	1,1
Q5-2	0,2	Q5-2	0,6	Q5-2	1
Q3-2	0,2	Q3-2	0,6	Q3-2	1
Q4-3	0,2	Q4-3	0,5	Q4-3	0,9
Q3-4	0,2	Q3-4	0,5	v1	0,9
T_amb=15°C					
	RN		RN		RN
v1	0,3	v1	0,8	v1	1,7
v2	0,3	Q2-3	0,5	Q2-3	1,1
Q2-3	0,2	v2	0,5	v2	1,1

Q5-2	0,2	Q5-2	0,5	v3	1
Q2-5	0,2	Q2-5	0,5	Q2-5	1
v3	0,2	v3	0,5	Q5-2	1
T_amb=30°C					
	RN		RN		RN
v1	0,7	v1	1,4	v1	2,5
v2	0,4	v2	0,9	v2	1,6
v3	0,4	v3	0,8	v3	1,5
V14	0,2	Q2-3	0,5	Q2-3	1,1
P6-5	0,2	v14	0,4	Q2-5	0,9
P7-4	0,2	Q5-2	0,4	Q5-2	0,9
T_amb=45°C					
	RN		RN		RN
v1	1,1	v1	2	v1	3,2
v2	0,7	v2	1,2	v2	2,1
v3	0,6	v3	1,1	v3	1,9
V14	0,4	V14	0,7	v14	1,1
P6-5	0,4	P6-5	0,5	Q2-3	1
P7-4	0,3	P7-4	0,5	Q1	0,9

En primer lugar hay que destacar un fenómeno ya observado en ensayos anteriores. Si se analiza una columna cualquiera de la *Tabla 40*, se aprecia como a medida que aumenta la temperatura ambiente, también lo hacen los residuos normalizados. Esto se debe a que, teniendo en cuenta el estado de carga de la red, al aumentar la temperatura ambiente, la temperatura de las líneas aumenta.

Por otro lado, la red que tiene resistencias más grandes, presenta mayores valores de los residuos normalizados para una misma temperatura ambiente. Al igual que en el apartado anterior, las resistencias más grandes son más sensibles a una variación de la temperatura, ya que cuanto mayor es la resistencia, mayor es el cambio que experimenta.

R grande T_amb=0°C				R grande T_amb=15°C			
T_cond =				T_cond =			
1	15	0	24.438	1	15	0	39.293
15	2	0	24.067	15	2	0	38.922
1	16	1	24.438	1	16	1	39.293
16	2	1	24.067	16	2	1	38.922
1	17	0	40.103	1	17	0	55.182
17	5	0	40.025	17	5	0	55.117
1	18	1	40.103	1	18	1	55.182
18	5	1	40.025	18	5	1	55.117
2	19	0	37.876	2	19	0	53.021
19	3	0	37.935	19	3	0	53.086
2	20	0	21.575	2	20	0	36.345
20	4	0	21.472	20	4	0	36.24
2	21	0	20.732	2	21	0	35.469
21	5	0	20.707	21	5	0	35.44
3	22	0	13.616	3	22	0	28.36
22	4	0	13.751	22	4	0	28.5
4	23	0	15.951	4	23	0	30.764
23	5	0	15.991	23	5	0	30.804
4	7	0	61.038	4	7	0	60.936
4	9	0	35.532	4	9	0	35.511
5	6	0	117.71	5	6	0	118.08
6	24	0	9.585	6	24	0	24.359
24	11	0	9.585	24	11	0	24.359
6	25	0	8.337	6	25	0	23.063
25	12	0	8.337	25	12	0	23.063
6	26	0	14.055	6	26	0	28.871
26	13	0	14.055	26	13	0	28.871
7	8	0	36.673	7	8	0	36.669
7	9	0	58.207	7	9	0	58.171
9	27	0	6.6544	9	27	0	21.363
27	10	0	6.6544	27	10	0	21.363
9	28	0	10.856	9	28	0	25.628
28	14	0	10.856	28	14	0	25.628
10	29	0	6.9542	10	29	0	21.689
29	11	0	6.9542	29	11	0	21.689
12	30	0	6.0236	12	30	0	20.722
30	13	0	6.0236	30	13	0	20.722
13	31	0	10.08	13	31	0	24.853
31	14	0	10.08	31	14	0	24.853

Ilustración 57: Temperaturas de la red IEEE14_v1 para valores de resistencias grandes y temperatura ambiente de 0 y 15°C.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

En este ensayo si aparece un fenómeno que antes no ocurría. Si se observa la segunda columna de la *Tabla40*, correspondiente a la resistencia aumentada un 50%, cuando la temperatura ambiente está a 0°C, los residuos normalizados rondan el valor de 0.6 y 0.5. Mientras que cuando dicha temperatura es de 15°C, los residuos rondan 0.5, salvo uno puntual de 0.8. En definitiva, en estas condiciones de carga y temperatura, la temperatura del conductor se encuentra próxima a 20°C, o la diferencia con respecto a 20°C es menor que cuando el ambiente se encuentra a 0°C, y por consecuencia, los residuos normalizados han disminuido. (Ver *Ilustración 57*).

Nota: Aunque no todas las temperaturas están próximas a 20°C, el hecho de que algunas si lo estén ya hace que los residuos disminuyan.

6.4.2 Red IEEE24_v2

Dicha red se corresponde con la de la *Ilustración 58*.

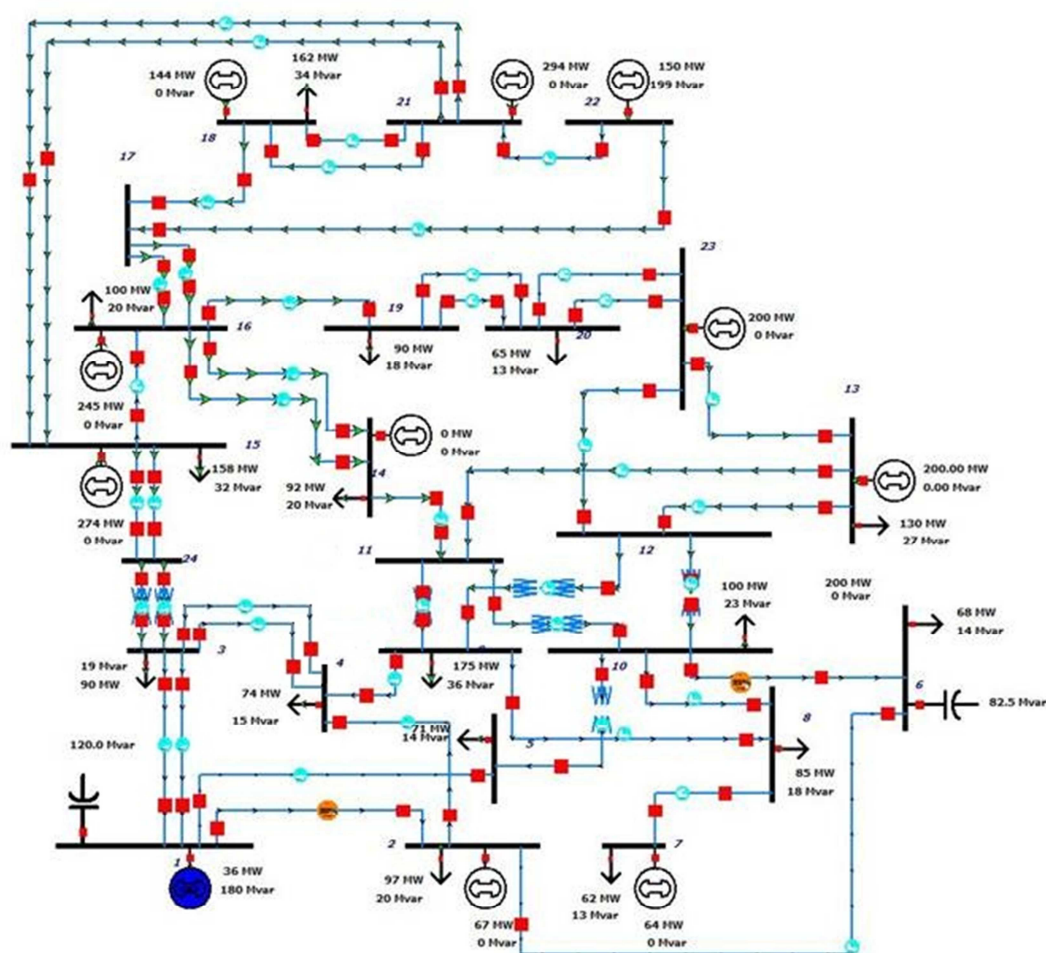


Ilustración 58: Red IEEE24_v2

De igual forma que con el apartado anterior, se realizan los mismos ensayos con la red IEEE24_v2.

Tabla 41: RN de la red IEEE24_v2 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.

IEEE24_v2					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_amb=0°C					
	RN		RN		RN
Q13-23	0,5	Q13-23	1,1	Q13-23	1,8
Q23-13	0,5	Q23-13	1	Q23-13	1,8
Q12-9	0,4	Q19-16	0,7	Q14-11	1,3
Q9-12	0,4	Q16-19	0,7	Q11-14	1,2
Q19-16	0,3	Q14-11	0,7	Q19-16	1,1
Q16-19	0,3	Q11-14	0,6	Q16-19	1,1
T_amb=15°C					
	RN		RN		RN
Q13-23	0,5	Q13-23	1,1	Q13-23	1,8
Q23-13	0,5	Q23-13	1	Q23-13	1,8
Q12-9	0,4	Q19-16	0,7	P9-4	1,2
Q19-16	0,4	P9-4	0,7	Q14-11	1,2
Q16-19	0,3	Q16-19	0,7	Q11-14	1,2
Q9-12	0,3	Q14-11	0,6	Q19-16	1,2
T_amb=30°C					
	RN		RN		RN
v8	0,5	Q13-23	1,1	Q13-23	1,8
v7	0,5	Q23-13	1,1	Q23-13	1,8
Q13-23	0,5	v8	1,1	v8	1,5
v6	0,5	v7	1	v7	1,5
Q23-13	0,5	v22	0,9	P9-4	1,4
v22	0,5	P9-4	0,8	P4-9	1,3
T_amb=45°C					
	RN		RN		RN
v8	0,8	v8	1,3	v8	2
v7	0,8	v7	1,3	v7	2
v22	0,7	v22	1,2	Q13-23	1,7
v6	0,7	v6	1,1	Q23-13	1,7
v21	0,6	Q13-23	1	v22	1,7
v5	0,6	v21	1	P9-4	1,6

En este caso, también ocurren los mismos fenómenos antes descritos. Al aumentar la temperatura ambiente, aumenta la temperatura de los conductores y con ello los residuos normalizados resultantes de la correspondiente estimación de estado. También se cumple que las redes con resistencias de mayor valor tienen mayores residuos normalizados a igual temperatura ambiente. Es decir, si en la *Tabla 41* se observa cada una de las filas, cuando aumenta el valor de las resistencias, también aumentan los residuos normalizados.

6.4.3 Red Kundur_v2

Al realizar los ensayos en la red Kundur_v2 (ver *Ilustración 43*) se obtienen los siguientes residuos normalizado tras realizar las correspondientes estimaciones de estado.

Tabla 42: RN de la red Kundur_v2 según la temperatura ambiente y valor de resistencia.

kundur_v2					
R normal		R grande (x1,5)		R muy grande (x2)	
T_amb =0°C					
	RN		RN		RN
Q7	0,2	Q7	0,3	Q7	0,3
Q8	0,2	Q8	0,2	v10	0,2
v10	0,1	v10	0,2	Q8	0,2
v9	0,1	v9	0,1	P9-3	0,2
Q7-8,2	0,1	P9-3	0,1	v9	0,2
Q7-8,1	0,1	v8	0,1	v8	0,1
T_amb =15°C					
	RN		RN		RN
Q8	0,3	Q8	0,3	v1	0,4
Q7	0,2	v1	0,3	v3	0,3
v14	0,2	v3	0,2	Q8	0,3
v3	0,1	v5	0,2	v5	0,3
v5	0,1	Q7-3	0,2	v4	0,2
Q8-7,2	0,1	v6	0,1	P9-3	0,2
T_amb =30°C					
	RN		RN		RN
v1	0,4	v1	0,5	v1	0,7
Q8	0,3	v5	0,5	v5	0,6
v5	0,3	v3	0,4	v3	0,6
v3	0,3	Q8	0,4	v4	0,5
v4	0,2	v4	0,4	Q8	0,4
v6	0,2	v6	0,3	v6	0,4
T_amb =45°C					
	RN		RN		RN
v14	0,6	v1	0,8	v1	1,1
v5	0,5	v5	0,7	v5	1
v4	0,4	v4	0,6	v4	0,9
Q8	0,4	v3	0,6	v3	0,8
v3	0,4	v10	0,5	v10	0,7
v10	0,3	Q8	0,5	v6	0,6

De igual forma que en los apartados previos, un aumento de la temperatura ambiente se traduce en un aumento de los residuos normalizados. Y al aumentar el tamaño de las resistencias, también aumentan los residuos normalizados, consecuencia de considerar no considerar la temperatura en la modificación de las resistencias en estimación de estado (ver *Tabla 42*).

6.5. Efecto del Flujo PQ y Temperatura Ambiente

En este apartado se procede a analizar un escenario más realista; se plantea para cada red unas condiciones de operación con un nivel de carga bajo y otro con un nivel más significativo. Estas situaciones se llevan a cabo con distintas situaciones de temperatura ambiente. De esta forma, se analiza cómo afecta el flujo de potencia activa y reactiva que transportan las redes según la temperatura ambiente del sistema.

En estos ensayos, la temperatura ambiente será la misma para todos los nudos, planteándose situaciones desde 0°C de mínima hasta 45°C de valores máximos. Los valores de las resistencias se mantienen tal cual se definen en las redes originales y el número de divisiones de las líneas es dos.

Las redes a considerar serán una red de media tensión, otra de alta y una tercera que combine ambas situaciones.

6.5.1 Red 115 kV

Esta red objeto de ensayo es la que se observa en la *Ilustración 50*, en la cual, tras realizar las estimaciones de estado pertinentes al modelo expuesto en el presente documento, se obtienen los resultados presentados en la *Tabla 43*.

Tabla 43: Comparación de RN de la red de 115 kV cargada y descargada según la temperatura ambiente.

RED_115kV		Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 0°C		RN		RN	
	Q1-2	0,5		Q5-2	0,5
	Q2-1	0,5		Q6-4	0,5
	Q4-1	0,3		Q4-6	0,5
	Q1-4	0,3		Q2-5	0,4
	Q4-2	0,2		Q1-3	0,4
	Q2-4	0,2		Q3-1	0,4

Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 15°C		RN	
Q1-2	0,2	Q2-1	1,6
Q2-1	0,2	Q1-2	1,6
Q4-1	0,1	Q1-3	0,9
Q1-4	0,1	Q3-1	0,9
P1-2	0,1	Q2-4	0,8
Q4-2	0,1	Q4-3	0,8

Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 30°C		RN	
Q1-2	0,2	Q2-1	3,1
Q2-1	0,2	Q1-2	3
Q1-4	0,1	Q4-1	1,6
Q4-1	0,1	Q1-4	1,6
Q3-1	0,1	Q1-3	1,4
Q1-3	0,1	Q3-1	1,4

Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 45°C		RN	
Q1-2	0,5	Q2-1	3,3
Q2-1	0,5	Q1-2	3,1
Q1-4	0,3	Q4-1	1,9
Q4-1	0,3	Q1-4	1,9
Q3-1	0,2	Q2-4	1,7
Q1-3	0,2	Q1-3	1,7

En este primer ensayo, al igual que en los realizados en el apartado 6.2 los residuos normalizados resultantes de la estimación de estado de las redes más cargadas presentan valores mucho más elevados que cuando estas no lo están. Esto es debido a que ante un mayor flujo de potencia activa y reactiva, el valor de la intensidad que circula por las líneas es mayor, dando lugar a un mayor calentamiento de los conductores. Además, en este caso puede apreciarse que la diferencia entre una situación de baja carga y otra de carga alta es notable. Por tanto, esto induce a pensar que no considerar el efecto de la temperatura en la estimación de estado, da lugar a errores significativos, con residuos que superan incluso los límites que determinan que una medida sea errónea.

Tal y como se ha expuesto en casos anteriores, un aumento de la temperatura ambiente, se traduce en un aumento de la temperatura de los conductores, y consecuentemente, mayores residuos normalizados tras realizar la pertinente estimación de estado.

No obstante, en este caso, se aprecia con mayor nitidez como puede darse el caso que, para unas condiciones

de operación dadas, una temperatura ambiente cercana a 15°C da lugar a que la temperatura de los conductores sea próxima a 20°C. En esta situación el aumento de la temperatura ambiente de 0°C a 15°C no da lugar a que aumenten los residuos normalizados.

Concretamente, cuando la red se encuentra descargada, los residuos normalizados para una temperatura ambiente de 0°C se encuentran entre 0.2 y 0.5. Mientras que, para 15°C, estos disminuyen a 0.1 y 0.2. Incluso cuando la temperatura ambiente asciende a 30°C, los residuos normalizados se mantienen del mismo orden. Serán más elevados, pero no aumentan significativamente. (Ver *Tabla 43*).

Entonces, no puede afirmarse que siempre que la temperatura ambiente ascienda, se obtendrán mayores residuos normalizados.

Red descargada

T_amb=0°C

T_amb=15°C

T_cond =

T_cond =

1	2	0	73.394	1	2	0	73.414
1	11	0	5.5424	1	11	0	20.24
11	3	0	5.5424	11	3	0	20.24
1	4	0	53.239	1	4	0	53.239
2	12	0	6.9959	2	12	0	21.701
12	4	0	6.9924	12	4	0	21.697
2	13	0	6.4613	2	13	0	21.163
13	5	0	6.4078	13	5	0	21.11
3	4	0	56.714	3	4	0	56.713
4	14	0	5.9326	4	14	0	20.632
14	6	0	5.8854	14	6	0	20.585
4	7	0	30.298	4	7	0	30.298
5	15	0	5.5411	5	15	0	20.239
15	6	0	5.5411	15	6	0	20.239
5	16	0	5.5467	5	16	0	20.244
16	9	0	5.5468	16	9	0	20.244
6	10	0	29.546	6	10	0	29.546
8	5	0	60.322	8	5	0	60.322

T_amb=30°C

T_cond =

1	2	0	73.435
1	11	0	34.96
11	3	0	34.96
1	4	0	53.238
2	12	0	36.424
12	4	0	36.421
2	13	0	35.886
13	5	0	35.832
3	4	0	56.71
4	14	0	35.353
14	6	0	35.306
4	7	0	30.298
5	15	0	34.959
15	6	0	34.959
5	16	0	34.964
16	9	0	34.964
6	10	0	29.546
8	5	0	60.322

Ilustración 59: Temperaturas de los conductores de la red de 115 kV descargada.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

6.5.2 Red 400 kV

De igual forma, se procede con la red de alta tensión, ver *Ilustración 52*. Los residuos normalizados obtenidos

de las correspondientes estimaciones de estado se muestran en la *Tabla 44*.

Tabla 44: Comparación de RN de la red de 400 kV cargada y descargada según la temperatura ambiente.

RED_400kV_v2			
Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 0°C	RN		RN
v1	0,2	Q7-5	2,4
v5	0,1	Q6-2	2
v2	0,1	Q5-7	1,8
Q2-5	0,1	Q2-6	1,7
Q5-2	0,1	Q5-2	1,7
v3	0,1	Q7-6	1,6
Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 15°C	RN		RN
Q2-5	0,1	Q7-5	2,9
Q5-2	0,1	Q6-2	2,2
Q4-2	0,1	Q5-7	1,9
Q2-4	0,1	Q2-6	1,9
v1	0,1	Q5-2	1,8
Q7-5	0,1	Q7-6	1,8
Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 30°C	RN		RN
v1	0,4	Q7-5	3,6
v5	0,3	Q6-2	2,6
v2	0,2	v7	2,5
v7	0,1	Q2-6	2,2
v3	0,1	Q7-6,0	2,1
Q2-5	0,1	Q7-6,1	2,1
Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 45°C	RN		RN
v1	0,6	NO COVERGE	
v5	0,5		
v2	0,4		
v7	0,2		
v3	0,2		
v4	0,2		

Al igual que en caso anterior, las redes con un nivel de carga presentan mayores residuos normalizados debido a la mayor circulación de intensidad que se traduce en una mayor temperatura del conductor. La diferencia entre la temperatura del conductor con respecto a 20°C es mayor, por tanto, al aplicar el modelo de estimación de estado planteado en el presente documento, los residuos normalizados son mayores. Algunos de los valores son superiores a 3, es decir, se están considerando erróneas medidas que son exactas.

Nota: En esta red incluso se da una situación en la cual el algoritmo de estimación de estado no converge. Este es un caso muy extremo.

Dado los valores de los residuos normalizados cuando la red presenta un alto nivel de carga, parece evidente la necesidad de tomar en consideración la temperatura de los conductores para modificar los valores de las resistencias en el modelo topológico. Los residuos normalizados en ciertos en muchos casos son bastante significativos.

A continuación, y de carácter informativo, se muestran las temperaturas de las líneas en unas condiciones normales de temperatura ambiente, 30°C, por ejemplo, para comparar la diferencia de temperatura de los conductores en ambas situaciones de carga.

Red Descargada				Red Cargada			
T_amb=30°C				T_amb=30°C			
T_cond =				T_cond =			
1	8	0	37.923	1	8	0	41.005
8	2	0	37.911	8	2	0	40.908
1	9	0	39.532	1	9	0	57.939
9	3	0	39.632	9	3	0	59.203
2	10	0	39.131	2	10	0	66.763
10	3	0	39.248	10	3	0	67.097
2	11	0	37.244	2	11	0	52.246
11	4	0	37.297	11	4	0	52.428
2	12	0	40.423	2	12	0	39.029
12	5	0	40.43	12	5	0	38.915
2	13	0	36.818	2	13	0	38.872
13	6	0	36.783	13	6	0	38.737
3	14	0	36.313	3	14	0	36.07
14	4	0	36.306	14	4	0	36.066
4	15	0	36.864	4	15	0	67.802
15	5	0	36.742	15	5	0	67.224
5	16	0	38.168	5	16	0	98.136
16	7	0	38.061	16	7	0	97.747
6	17	0	36.641	6	17	0	47.616
17	7	0	36.585	17	7	0	47.225
6	18	1	36.641	6	18	1	47.616
18	7	1	36.585	18	7	1	47.225

Ilustración 60: Temperaturas de los conductores de la red de 400 kV cargada y descargada con una temperatura ambiente de 30°C.

Puede observarse como en algunos casos la diferencia de temperatura consecuencia del nivel de carga es de aproximadamente 10°C como puede ser el caso de la línea 6-18, mientras que en otros, la diferencia es mucho más acusada, véase la línea 5-16.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

6.5.3 Red IEEE30

Finalmente, se repiten los mismos ensayos realizados en los apartados previos para la red IEEE30 (ver

Ilustración 54).

Tabla 45: Comparación de RN de la red IEEE30 cargada y descargada según la temperatura ambiente.

RED_IEEE30		Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 0°C		RN		RN	
	Q11-12	1,5		Q11-12	2,2
	Q12-11	1,4		Q12-11	2,1
	Q11-10	1,2		Q10-12	1,7
	Q10-12	1,2		Q11-10	1,7
	Q12-10	1,2		Q12-10	1,7
	Q10-11	1,2		Q10-11	1,7
		Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 15°C		RN		RN	
	Q11-12	1,6		Q11-12	2,3
	Q12-11	1,5		Q12-11	2,2
	Q10-12	1,1		Q11-7	1,6
	Q12-10	1,1		Q10-12	1,6
	Q11-10	1,1		Q12-10	1,6
	Q10-11	1,1		Q11-10	1,5
		Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 30°C		RN		RN	
	Q11-12	1,7		Q11-12	2,5
	Q11-7	1,7		Q11-7	2,4
	Q12-11	1,6		Q12-11	2,3
	v1	1		Q10-12	1,5
	Q10-12	1		Q12-10	1,5
	Q12-10	1		Q11-10	1,4
		Red Descargada		Red Cargada	
T_amb = 45°C		RN		RN	
	Q11-7	2,3		Q11-7	3,2
	Q11-12	1,9		Q11-12	2,6
	Q12-11	1,8		Q12-11	2,4
	v1	1,4		v1	1,5
	Q18-15	1,3		Q21-27	1,5
	Q15-18	1,2		Q18-15	1,5

Se aprecian los mismos fenómenos que en los ensayos anteriores (ver *Tabla 45*). Ante un aumento del nivel de carga, se produce mayor intensidad que recorre la red, y consecuentemente, una mayor temperatura de los conductores. Como resultado, se obtienen mayores residuos normalizados al realizar la estimación de estado sin tener en cuenta la temperatura de los conductores.

No puede asegurarse que al aumentar la temperatura ambiente se produzca un aumento de los residuos normalizados, consecuencia de la estimación de estado. Sin embargo, un aumento de la temperatura ambiente sí se traduce en un aumento de la temperatura de las líneas. Si además, la temperatura ambiente se encuentra por encima de los 20°C, entonces siempre se cumple que al aumentar la temperatura ambiente aumentan los valores de los residuos normalizados, independientemente del estado de carga.

Nota: La temperatura de los conductores siempre está como mínimo a la temperatura ambiente, a excepción de los transformadores.

7 CONCLUSIONES DE LOS ENSAYOS CON TEMPERATURAS AMBIENTE CONSTANTES

Tras realizar los ensayos expuestos en el apartado 6, se puede concluir que la temperatura tiene una elevada influencia en la estimación de estado convencional. No considerarla en cálculo de las resistencias del modelo topológico que emplea dicha herramienta, implica que muchas medidas consideradas exactas presenten residuos normalizados, en muchos casos elevados.

Cuanto mayor es la temperatura de los conductores, mayor es la diferencia de los valores de las resistencias del modelo topológico de la red original con respecto a la que debería tener teniendo en cuenta la temperatura de operación a la que se encuentran las líneas. Por tanto, se obtendrán mayores residuos normalizados si no se considera la temperatura en el modelo topológico de la red para la estimación de estado.

Siendo más exhaustivo en este apartado, hay situaciones y escenarios que suponen una mayor sensibilidad de la herramienta de estimación al no considerar la temperatura de los conductores. Por ello, se puede concluir:

- A mayor temperatura ambiente, siempre se obtendrán mayores residuos normalizados si la temperatura ambiente se encuentra por encima de 20°C. En caso contrario, dependerá del nivel de carga del sistema.
- Cuanto mayor nivel de carga presente la red, mayor valor de los residuos normalizados se obtendrán consecuencia de no considerar la temperatura en la estimación de estado. Ya que circulará una mayor intensidad y, por tanto, la temperatura de los conductores aumenta.
- Un mayor nivel de carga implica una mayor sensibilidad de las medidas ante la no consideración de la temperatura en la herramienta de estimación.
- Cuanto mayores sean los parámetros resistivos de las líneas que forman la red, mayores residuos normalizados se obtendrán consecuencia de no considerar la temperatura en la estimación de estado.
- Las redes o líneas con resistencias de mayor valor presentan mayor sensibilidad en las medidas ante la no consideración de la temperatura en la herramienta de estimación.
- La combinación de factores como la temperatura ambiente, el valor de la resistencia o el nivel de carga de la red supone un aumento de la temperatura de los conductores y, consecuentemente, un aumento de los residuos normalizados consecuencia de no considerar la temperatura en la estimación de estado.
- El nivel de tensión del sistema no afecta, a priori, de forma diferente en la obtención de mayores o menores residuos normalizados.
- El nivel de carga, tamaño de las resistencias y temperatura ambiente son, sin tener en consideración el resto de parámetros ambientales y meteorológicos, los principales factores que pueden provocar residuos normalizados distintos de cero en la correspondiente estimación de estado al no considerar la temperatura de los conductores en la herramienta de estimación.
- En situaciones en las que el nivel de carga sea bajo, temperaturas ambientes suaves (sin superar los 20°C) y con resistencias no elevadas, la estimación de estado convencional no presenta residuos normalizados significativos (por debajo de 0.2).

8 APLICACIÓN CON DIFERENCIAS EN LA TEMPERATURA AMBIENTE DE SUBESTACIONES

Hasta ahora, en todas las simulaciones llevadas a cabo la temperatura ambiente se suponía constante e igual para todos los nudos. Por tanto, se plantea comprobar si, en caso de ser esta variable, como de significativo es no considerar la temperatura en la estimación de estado.

Para llevar a cabo estos ensayos se emplea una red real australiana de 14 generadores simplificada. Dicha red es la que se presenta en la *Ilustración 61*.

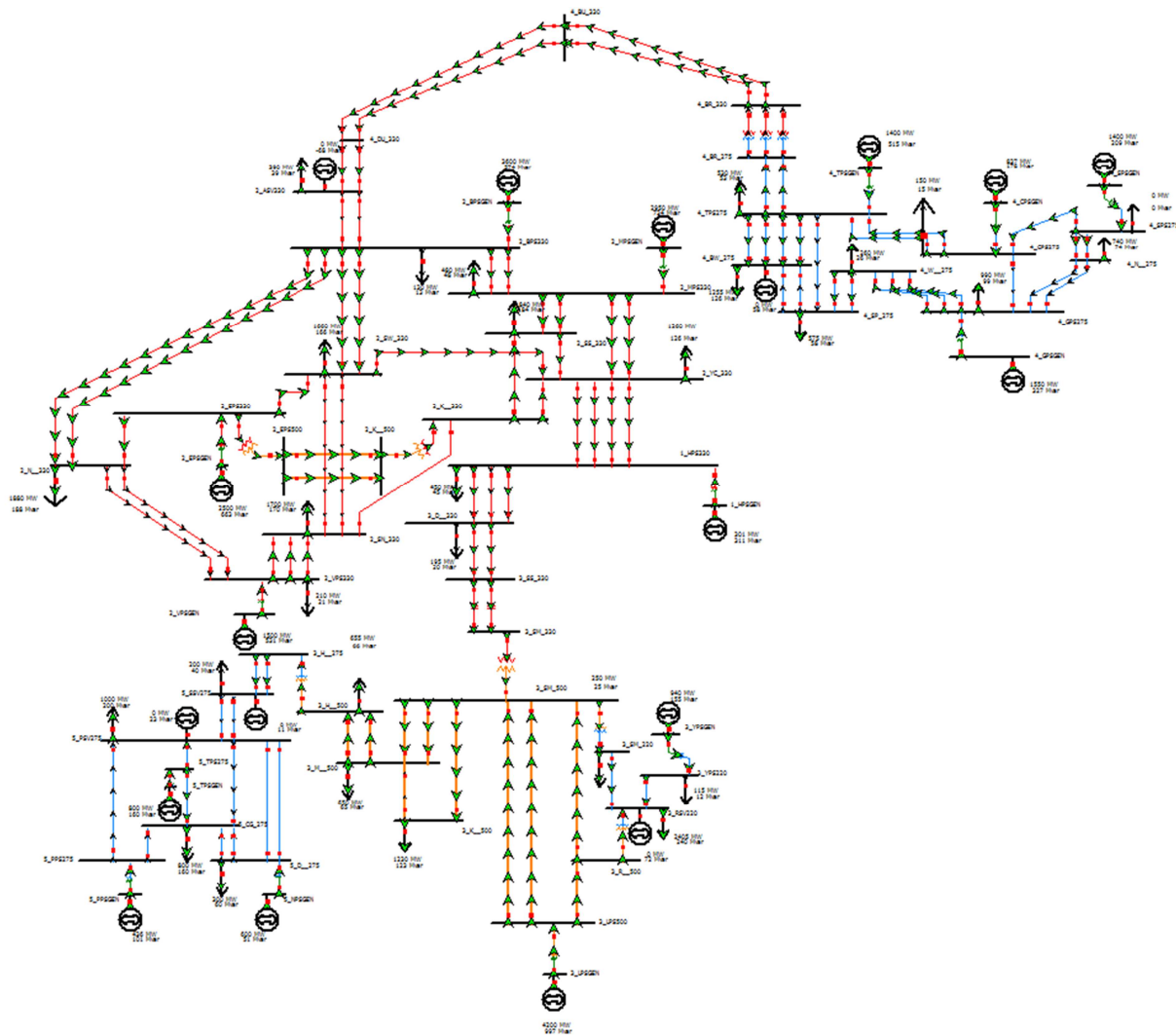


Ilustración 61: Red australiana de 14 generadores simplificada.

Debido a la extensa dimensión de la red, por motivos de simplicidad de cara a simular el estado de carga de la misma, se divide la red en tres áreas:

- El área 1 (A1), la cual abarca la parte sur de la red.
- El área 2 (A2), la cual abarca la parte noreste de la red.
- El área 3 (A3), la cual abarca la parte norte y central de la red.

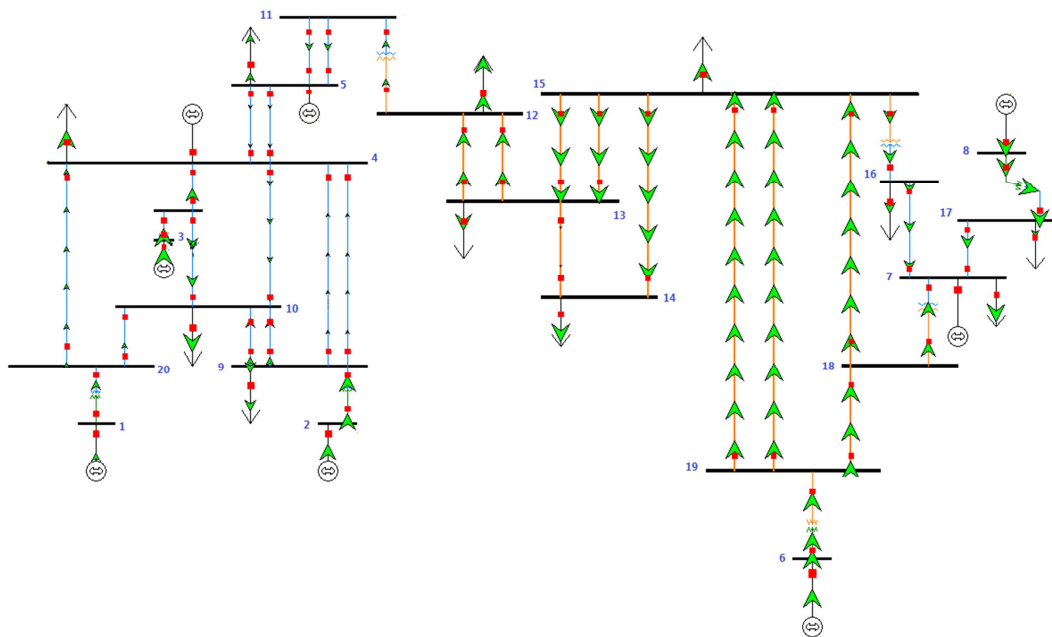


Ilustración 62: Red australiana de 14 generadores simplificada A1.

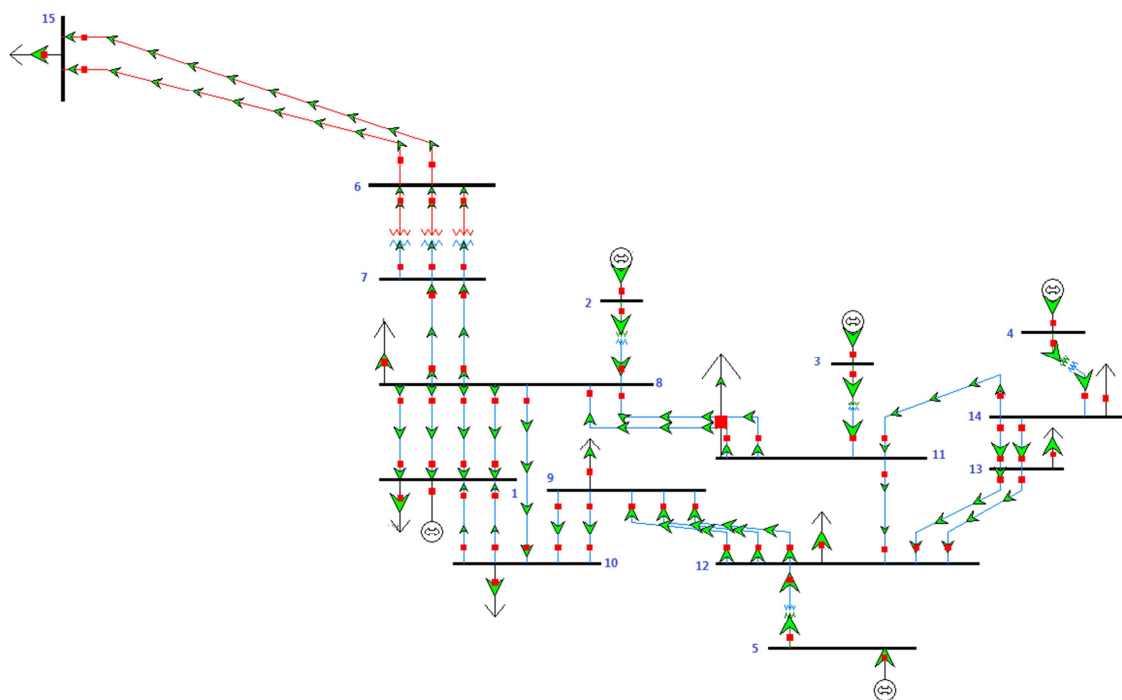


Ilustración 63: Red australiana de 14 generadores simplificada A2.

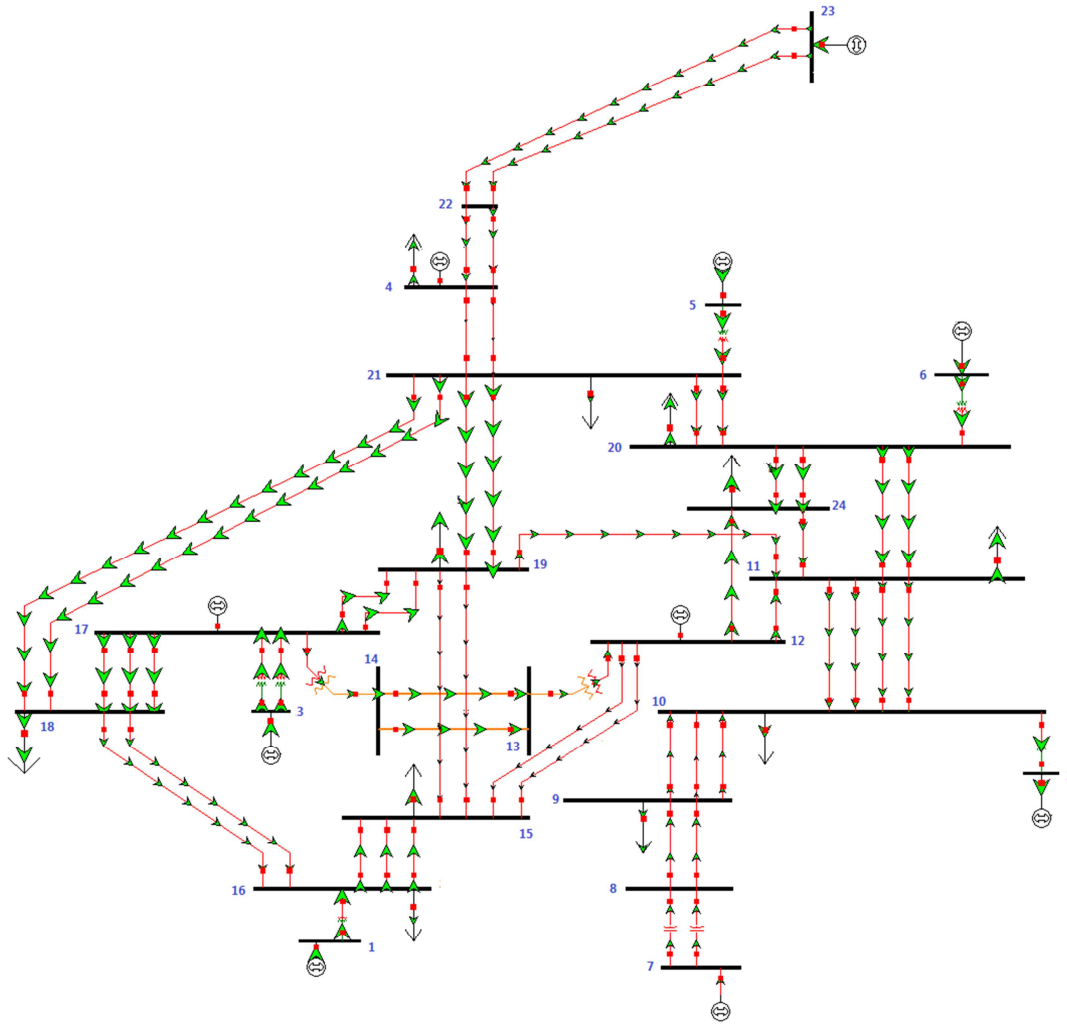


Ilustración 64: Red australiana de 14 generadores simplificada A3.

8.1. Temperatura Ambiente Aleatoria

En este apartado se procede a establecer una serie de temperaturas ambiente de los nudos de forma aleatoria. Estas temperaturas se clasifican en suaves, cálidas y frías, las cuales se encuentran dentro de un rango determinado según lo indicado en la *Tabla 26*. En caso de considerarse temperaturas suaves se considerará la estación de primavera, aunque también podría haberse tomado otoño.

Determinada la temperatura ambiente de cada nodo, se ejecuta el modelo de estimación de planteado en el presente documento, y como resultado se obtendrán una serie de residuos normalizados.

8.1.1 Temperaturas Frías

En la *Tabla 46* se muestran las temperaturas ambientes de los nodos de cada área.

Tabla 46: Temperaturas ambiente frías de la red australiana de 14 generadores simplificada.

A1		A2		A3	
Nodos	Temp_amb (°C)	Nodos	Temp_amb (°C)	Nodos	Temp_amb (°C)
1	9	1	2	1	3
2	4	2	14	2	3
3	8	3	12	3	3
4	8	4	6	4	5
5	2	5	13	5	14
6	12	6	2	6	5
7	5	7	2	7	8
8	7	8	14	8	9
9	4	9	0	9	9
10	12	10	12	10	3
11	14	11	12	11	5
12	14	12	13	12	3
13	5	13	1	13	3
14	3	14	6	14	3
15	4	15	4	15	3
16	4			16	3
17	7			17	3
18	5			18	3
19	12			19	7
20	9			20	5
21	8			21	14
				22	6
				23	3
				24	14

Una vez asignada las temperaturas ambientes, se calculan las temperaturas de los conductores (ver *Ilustración 65 y 66*).

A1				A2			
T_cond =				T_cond =			
1	20	0	49.216	5	12	0	25.508
20	22	0	15.489	4	14	0	25.508
22	4	0	15.247	14	16	0	11.483
20	23	0	16.689	16	13	0	10.264
23	10	0	17.373	14	17	1	11.483
2	9	0	63.308	17	13	1	10.264
9	24	0	13.558	14	18	0	14.939
24	10	0	16.278	18	11	0	16.402
9	25	1	13.558	13	19	0	10.744
25	10	1	16.278	19	12	0	13.656
9	26	0	11.636	13	20	1	10.744
26	4	0	12.659	20	12	1	13.656
9	27	1	11.636	11	21	0	19.513
27	4	1	12.659	21	12	0	19.71
10	28	0	17.523	3	11	0	63.908
28	4	0	16.566	11	22	0	21.628
3	21	0	60.728	22	8	0	22.267
21	29	0	15.757	11	23	1	21.628
29	10	0	16.74	23	8	1	22.267
21	30	0	15.524	12	24	0	17.926
30	4	0	15.541	24	9	0	15.091
4	31	0	33.279	12	25	1	17.926
31	5	0	32.428	25	9	1	15.091
4	32	1	33.279	12	26	2	17.926
32	5	1	32.428	12	26	2	17.926
5	33	0	9.83	26	9	2	15.091
33	11	0	10.686	9	27	0	25.594
5	34	1	9.83	27	10	0	28.77
34	11	1	10.686	9	28	1	25.594
11	12	0	26.382	28	10	1	28.77
12	35	0	18.375	8	29	0	20.115
35	13	0	16.181	29	10	0	19.682
12	36	1	18.375	10	30	0	20.133
36	13	1	16.181	30	1	0	17.766
13	37	0	11.148	10	31	1	20.133
37	14	0	10.661	31	1	1	17.766
14	38	0	9.975	8	32	0	19.483
38	15	0	10.219	32	1	0	16.695
13	39	0	11.458	8	33	1	19.483
39	15	0	11.215	33	1	1	16.695
13	40	1	11.458	8	34	2	19.483
40	15	1	11.215	34	1	2	16.695
15	41	0	12.638	8	35	3	19.483
41	19	0	14.586	35	1	3	16.695
15	42	1	12.638	8	36	0	18.902
42	19	1	14.586	36	7	0	15.91
6	19	0	49.811	8	37	1	18.902
19	43	0	16.771	37	7	1	15.91
43	18	0	15.059	2	8	0	64.576
18	44	0	11.438	7	6	0	32.999
44	15	0	11.194	7	6	1	32.999
18	7	0	36.772	7	6	2	32.999
16	45	0	14.65	6	38	0	13.188
45	7	0	13.417	38	15	0	12.423
15	16	0	36.578	6	39	1	13.188
17	46	0	14.228	39	15	1	12.423
46	7	0	13.455				
8	17	0	52.193				

Ilustración 65: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).

A3							
T_cond =							
23	25	0	10.81	11	48	3	14.798
25	22	0	11.585	48	10	3	13.921
23	26	1	10.81	2	10	0	38.346
26	22	1	11.585	10	49	0	14.704
22	27	0	14.176	49	9	0	15.858
27	4	0	14.159	10	50	1	15.829
22	28	1	14.176	50	9	1	13.935
28	4	1	14.159	10	51	2	14.704
4	29	0	32.904	51	9	2	15.858
29	21	0	34.436	9	52	0	16.889
4	30	1	32.904	52	8	0	16.217
30	21	1	34.436	9	53	1	16.889
5	21	0	42.961	53	8	1	16.217
21	31	0	20.85	8	54	0	15.287
31	20	0	18.201	54	7	0	15.044
21	32	1	20.85	8	55	1	15.287
32	20	1	18.201	55	7	1	15.044
6	20	0	55.573	17	56	0	17.806
20	33	0	15.173	56	19	0	18.464
33	24	0	17.651	17	57	1	17.806
20	34	1	15.173	57	19	1	18.464
34	24	1	17.651	17	58	0	12.764
24	35	0	24.196	58	18	0	12.71
35	11	0	21.579	17	59	1	12.764
20	36	0	12.164	59	18	1	12.71
36	11	0	12.135	17	60	2	12.764
20	37	1	12.164	60	18	2	12.71
37	11	1	12.135	3	17	0	104.22
21	38	0	20.097	3	17	1	104.22
38	18	0	17.498	17	14	0	47.934
21	39	1	20.097	14	61	0	17.034
39	18	1	17.498	61	13	0	14.594
21	40	0	19.441	14	62	1	17.034
40	19	0	17.77	62	13	1	14.594
21	41	1	19.441	13	12	0	44.515
41	19	1	17.77	15	63	0	11.48
19	42	0	16.265	63	12	0	12.386
42	11	0	15.603	15	64	1	11.48
12	43	0	17.935	64	12	1	12.386
43	24	0	19.611	19	65	0	12.737
12	44	0	24.762	65	15	0	11.73
44	11	0	23.851	19	66	1	12.737
11	45	0	14.458	66	15	1	11.73
45	10	0	13.692	18	67	0	10.908
11	46	1	14.458	67	16	0	10.787
46	10	1	13.692	18	68	1	10.908
11	47	2	14.798	68	16	1	10.787
47	10	2	13.921	16	69	0	11.406
				69	15	0	11.373
				16	70	1	11.406
				70	15	1	11.373
				16	71	2	11.406
				71	15	2	11.373
				1	16	0	108.28

Ilustración 66: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

La *Ilustración 65* y *66* presentan 4 columnas; las dos primeras corresponden a los nudos inicial y final de los segmentos de las líneas. La tercera, indica el número de circuito, tomando valores desde 0, para el circuito 1, e incrementando el valor según aumente el número de líneas. Finalmente, la cuarta columna muestra la temperatura del conductor en °C.

8.1.2 Temperaturas Suaves

De igual modo se presentan las temperaturas ambientes asignadas a los nudos y posteriormente las temperaturas de los conductores de cada área (ver *Tabla 47* e *Ilustración 67* y *68*).

Tabla 47: Temperaturas ambiente suaves de la red australiana de 14 generadores simplificada.

A1		A2		A3	
Nudos	Temp_amb (°C)	Nudos	Temp_amb (°C)	Nudos	Temp_amb (°C)
1	14	1	24	1	16
2	14	2	11	2	18
3	18	3	24	3	11
4	17	4	17	4	13
5	17	5	12	5	14
6	21	6	11	6	13
7	13	7	11	7	12
8	19	8	11	8	23
9	14	9	18	9	19
10	20	10	22	10	18
11	12	11	24	11	12
12	12	12	12	12	23
13	12	13	19	13	23
14	17	14	17	14	11
15	24	15	10	15	18
16	24			16	16
17	19			17	11
18	13			18	14
19	21			19	12
20	14			20	13
21	18			21	14
				22	16
				23	11
				24	24

Las correspondientes temperaturas de las líneas son que muestran la *Ilustración 67* y *68*.

A1				A2			
T_cond =				T_cond =			
1	20	0	49.216	5	12	0	25.508
20	22	0	21.338	4	14	0	25.508
22	4	0	22.07	14	16	0	23.91
20	23	0	22.295	16	13	0	24.396
23	10	0	23.709	14	17	1	23.91
2	9	0	63.308	17	13	1	24.396
9	24	0	22.814	14	18	0	25.91
24	10	0	25.049	18	11	0	27.62
9	25	1	22.814	13	19	0	23.656
25	10	1	25.049	19	12	0	21.942
9	26	0	21.138	13	20	1	23.656
26	4	0	21.919	20	12	1	21.942
9	27	1	21.138	11	21	0	28.048
27	4	1	21.919	21	12	0	25.084
10	28	0	25.569	3	11	0	63.908
28	4	0	24.853	11	22	0	29.671
3	21	0	60.728	22	8	0	26.693
21	29	0	25.019	11	23	1	29.671
29	10	0	25.516	23	8	1	26.693
21	30	0	25.03	12	24	0	21.608
30	4	0	24.804	24	9	0	23.375
4	31	0	43.47	12	25	1	21.608
31	5	0	43.984	25	9	1	23.375
4	32	1	43.47	12	26	2	21.608
32	5	1	43.984	26	9	2	23.375
5	33	0	24.704	9	27	0	41.148
33	11	0	25.808	27	10	0	42.505
5	34	1	24.704	9	28	1	41.148
34	11	1	25.808	28	10	1	42.505
11	12	0	26.379	8	29	0	20.361
12	35	0	18.619	29	10	0	23.094
35	13	0	18.616	10	30	0	32.844
12	36	1	18.619	30	1	0	33.353
36	13	1	18.616	10	31	1	32.844
13	37	0	19.674	31	1	1	33.353
37	14	0	20.893	8	32	0	22.681
14	38	0	25.082	32	1	0	25.936
38	15	0	26.79	8	33	1	22.681
13	39	0	21.447	33	1	1	25.936
39	15	0	24.373	8	34	2	22.681
13	40	1	21.447	34	1	2	25.936
40	15	1	24.373	8	35	3	22.681
15	41	0	29.459	35	1	3	25.936
41	19	0	28.727	8	36	0	18.911
15	42	1	29.459	36	7	0	18.827
42	19	1	28.727	8	37	1	18.911
6	19	0	49.811	37	7	1	18.827
19	43	0	25.303	2	8	0	64.576
43	18	0	23.346	7	6	0	32.999
18	44	0	22.158	7	6	1	32.999
44	15	0	24.84	7	6	2	32.999
18	7	0	36.764	6	38	0	23.422
16	45	0	23.18	38	15	0	21.195
45	7	0	24.625	6	39	1	23.422
15	16	0	36.578	39	15	1	21.195
17	46	0	27.155				
46	7	0	27.593				
8	17	0	52.193				

Ilustración 67: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).

A3							
T_cond =							
23	25	0	19.093	11	48	3	23.586
25	22	0	20.355	48	10	3	24.633
23	26	1	19.093	2	10	0	38.346
26	22	1	20.355	10	49	0	28.103
22	27	0	23.435	49	9	0	28.056
27	4	0	22.934	10	50	1	29.221
22	28	1	23.435	50	9	1	26.126
28	4	1	22.934	10	51	2	28.103
4	29	0	38.637	51	9	2	28.056
29	21	0	38.363	9	52	0	27.618
4	30	1	38.637	52	8	0	27.919
30	21	1	38.363	9	53	1	27.618
5	21	0	42.961	53	8	1	27.919
21	31	0	22.799	8	54	0	26.501
31	20	0	22.084	54	7	0	23.818
21	32	1	22.799	8	55	1	26.501
32	20	1	22.084	55	7	1	23.818
6	20	0	55.573	17	56	0	24.87
20	33	0	23.462	56	19	0	24.818
33	24	0	26.428	17	57	1	24.87
20	34	1	23.462	57	19	1	24.818
34	24	1	26.428	17	58	0	21.3
24	35	0	33.214	58	18	0	21.969
35	11	0	29.878	17	59	1	21.3
20	36	0	19.717	59	18	1	21.969
36	11	0	19.445	17	60	2	21.3
20	37	1	19.717	60	18	2	21.969
37	11	1	19.445	3	17	0	104.53
21	38	0	22.795	3	17	1	104.53
38	18	0	22.851	17	14	0	47.96
21	39	1	22.795	14	61	0	22.396
39	18	1	22.851	61	13	0	23.367
21	40	0	20.663	14	62	1	22.396
40	19	0	20.207	62	13	1	23.367
21	41	1	20.663	13	12	0	44.574
41	19	1	20.207	15	63	0	26.347
19	42	0	21.631	63	12	0	27.497
42	11	0	21.451	15	64	1	26.347
12	43	0	32.07	64	12	1	27.497
43	24	0	32.3	19	65	0	20.046
12	44	0	38.116	65	15	0	21.475
44	11	0	35.102	19	66	1	20.046
11	45	0	23.244	66	15	1	21.475
45	10	0	24.405	18	67	0	22.119
11	46	1	23.244	67	16	0	22.483
46	10	1	24.405	18	68	1	22.119
11	47	2	23.586	68	16	1	22.483
47	10	2	24.633	16	69	0	24.565
				69	15	0	25.015
				16	70	1	24.565
				69	15	0	25.015
				16	70	1	24.565
				70	15	1	25.015
				16	71	2	24.565
				71	15	2	25.015
				1	16	0	108.28

Ilustración 68: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

8.1.3 Temperaturas Cálidas

Finalmente, se presentan las mismas tablas e ilustraciones que en los apartados anteriores cuando las temperaturas ambiente de los nudos de cada área (ver *Tabla 48* e *Ilustración 69* y *70*).

Tabla 48: Temperaturas ambiente cálidas de la red australiana de 14 generadores simplificada.

A1		A2		A3	
Nudos	Temp_amb (°C)	Nudos	Temp_amb (°C)	Nudos	Temp_amb (°C)
1	31	1	28	1	32
2	24	2	27	2	29
3	30	3	39	3	31
4	37	4	26	4	34
5	39	5	31	5	33
6	21	6	35	6	33
7	44	7	35	7	25
8	28	8	27	8	37
9	24	9	36	9	25
10	38	10	37	10	29
11	27	11	39	11	36
12	27	12	31	12	40
13	21	13	22	13	40
14	22	14	26	14	31
15	41	15	43	15	39
16	41			16	32
17	28			17	31
18	44			18	31
19	21			19	28
20	31			20	33
21	30			21	33
				22	40
				23	40
				24	36

Mientras que las temperaturas de los conductores de cada área son las que se muestran en la *Ilustración 69* y *70*.

A1				A2			
T_cond =				T_cond =			
1	20	0	49.216	5	12	0	25.508
20	22	0	38.666	4	14	0	25.508
22	4	0	40.132	14	16	0	31.23
20	23	0	39.134	16	13	0	30.252
23	10	0	40.796	14	17	1	31.23
2	9	0	63.308	17	13	1	30.252
9	24	0	34.524	14	18	0	36.167
24	10	0	38.702	18	11	0	39.34
9	25	1	34.524	13	19	0	30.487
25	10	1	38.702	19	12	0	32.676
9	26	0	33.337	13	20	1	30.487
26	4	0	36.562	20	12	1	32.676
9	27	1	33.337	11	21	0	43.686
27	4	1	36.562	21	12	0	41.689
10	28	0	43.638	3	11	0	63.908
28	4	0	43.41	11	22	0	44.586
3	21	0	60.728	22	8	0	41.848
21	29	0	38.201	11	23	1	44.586
29	10	0	40.164	23	8	1	41.848
21	30	0	38.702	12	24	0	39.924
30	4	0	40.423	24	9	0	41.46
4	31	0	63.286	12	25	1	39.924
31	5	0	64.281	25	9	1	41.46
4	32	1	63.286	12	26	2	39.924
32	5	1	64.281	26	9	2	41.46
5	33	0	41.075	9	27	0	57.969
33	11	0	37.073	27	10	0	58.648
5	34	1	41.075	9	28	1	57.969
34	11	1	37.073	28	10	1	58.648
11	12	0	26.376	8	29	0	35.732
12	35	0	31.789	29	10	0	38.226
35	13	0	30.323	10	30	0	44.793
12	36	1	31.789	30	1	0	42.659
36	13	1	30.323	10	31	1	44.793
13	37	0	27.478	31	1	1	42.659
37	14	0	27.722	8	32	0	35.363
14	38	0	32.891	32	1	0	35.717
38	15	0	37.531	8	33	1	35.363
13	39	0	32.182	33	1	1	35.717
39	15	0	37.064	8	34	2	35.363
13	40	1	32.182	34	1	2	35.717
40	15	1	37.064	8	35	3	35.363
15	41	0	41.914	35	1	3	35.717
41	19	0	37.028	8	36	0	36.481
15	42	1	41.914	36	7	0	38.34
42	19	1	37.028	8	37	1	36.481
6	19	0	49.811	37	7	1	38.34
19	43	0	32.868	2	8	0	64.576
43	18	0	38.479	7	6	0	32.999
18	44	0	49.022	7	6	1	32.999
44	15	0	48.288	7	6	2	32.999
18	7	0	36.756	6	38	0	35.14
16	45	0	41.486	38	15	0	39.74
45	7	0	39.762	6	39	1	35.14
15	16	0	36.583	39	15	1	39.74
17	46	0	35.945				
46	7	0	36.383				
8	17	0	52.193				

Ilustración 69: Temperatura de los conductores del área 1 (A1) y área 2 (A2).

A3							
T_cond =							
5	12	0	25.508	11	48	3	43.819
4	14	0	25.508	48	10	3	41.736
14	16	0	31.23	2	10	0	38.346
16	13	0	30.252	10	49	0	37.615
14	17	1	31.23	49	9	0	36.364
17	13	1	30.252	10	50	1	38.72
14	18	0	36.167	50	9	1	34.427
18	11	0	39.34	10	51	2	37.615
13	19	0	30.487	51	9	2	36.364
19	12	0	32.676	9	52	0	35.432
13	20	1	30.487	52	8	0	37.681
20	12	1	32.676	9	53	1	35.432
11	21	0	43.686	53	8	1	37.681
21	12	0	41.689	8	54	0	39.929
3	11	0	63.908	54	7	0	36.998
11	22	0	44.586	8	55	1	39.929
22	8	0	41.848	55	7	1	36.998
11	23	1	44.586	17	56	0	43.413
23	8	1	41.848	56	19	0	42.409
12	24	0	39.924	17	57	1	43.413
24	9	0	41.46	57	19	1	42.409
12	25	1	39.924	17	58	0	40.095
25	9	1	41.46	58	18	0	40.041
12	26	2	39.924	17	59	1	40.095
26	9	2	41.46	59	18	1	40.041
9	27	0	57.969	17	60	2	40.095
27	10	0	58.648	60	18	2	40.041
9	28	1	57.969	3	17	0	105.53
28	10	1	58.648	3	17	1	105.53
8	29	0	35.732	17	14	0	48.036
29	10	0	38.226	14	61	0	43.637
10	30	0	44.793	61	13	0	38.501
30	1	0	42.659	14	62	1	43.637
10	31	1	44.793	62	13	1	38.501
31	1	1	42.659	13	12	0	44.711
8	32	0	35.363	15	63	0	45.883
32	1	0	35.717	63	12	0	46.06
8	33	1	35.363	15	64	1	45.883
33	1	1	35.717	64	12	1	46.06
8	34	2	35.363	19	65	0	36.883
34	1	2	35.717	65	15	0	39.536
8	35	3	35.363	19	66	1	36.883
35	1	3	35.717	66	15	1	39.536
8	36	0	36.481	18	67	0	38.472
36	7	0	38.34	67	16	0	38.593
8	37	1	36.481	18	68	1	38.472
37	7	1	38.34	68	16	1	38.593
2	8	0	64.576	16	69	0	41.413
7	6	0	32.999	69	15	0	43.077
7	6	1	32.999	16	70	1	41.413
7	6	2	32.999	70	15	1	43.077
6	38	0	35.14	16	71	2	41.413
38	15	0	39.74	71	15	2	43.077
6	39	1	35.14	1	16	0	108.28
39	15	1	39.74				

Ilustración 70: Temperatura de los conductores del área 3 (A3).

Nota: En las ilustraciones se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

8.1.4 Comparación de los Residuos Normalizados

A continuación, se muestran los residuos normalizados, obtenidos para cada área, ordenados según temperaturas ambiente frías, suaves y cálidas:

Tabla 49: RN del área 1 (A1) según temperaturas ambiente.

A1	T. frías		T. suaves		T. cálidas	
		RN		RN		RN
	Q5	0,4	Q5	0,7	Q5	1,2
	Q5-4,0	0,3	Q5-4,0	0,5	Q5-4,0	0,9
	Q5-4,1	0,3	Q5-4,1	0,5	Q5-4,1	0,9
	Q11	0,2	Q4	0,3	Q4	0,7
	Q4	0,1	Q4-5,0	0,3	Q4-5,0	0,6
	v9	0,1	Q4-5,1	0,3	Q4-5,1	0,6

En la *Tabla 49* se observa como a medida que aumenta la temperatura ambiente de cada área, siendo estas temperaturas distintas para cada nodo, aumentan los residuos normalizados. Esto es consecuencia de un aumento de la temperatura de los conductores.

Si se analizan las temperaturas de las líneas de las *Ilustraciones 65, 67 y 69* de los apartados anteriores, se puede observar como la temperatura de éstas ronda los 15°C si las temperaturas ambiente son frías, entre 20 y 25°C si son suaves y 35°C si son calida. Por tanto un aumento de la temperatura de los conductores se traduce en un aumento de los residuos normalizados de la estimación de estado, consecuencia de no considerar la temperatura de los conductores en las resistencias del modelo topológico de la red.

Además, llama la atención que las medidas con mayores residuos normalizados no son necesariamente las mismas. Por ejemplo, cuando las temperaturas ambiente son frías, entre las cinco medidas con mayores residuos están Q₉ y V₅, sin embargo, las otras dos situaciones, estas medidas no aparecen entre las cinco más remarcables.

Tabla 50: RN del área 2 (A2) según temperaturas ambiente.

A2	T. frías		T. suaves		T. cálidas	
		RN		RN		RN
	Q11	0,1	Q11-8,0	0,3	Q11-8,0	0,4
	Q9	0,1	Q11-8,1	0,3	Q11-8,1	0,4
	Q10	0,1	Q8-11,0	0,2	Q8-11,0	0,4
	Q11-8,0	0,1	Q8-11,1	0,2	Q8-11,1	0,4
	Q11-8,1	0,1	Q11	0,2	Q11	0,3
	v9	0,1	Q10	0,2	Q10	0,3

De igual forma, analizando el área dos, se observa el mismo fenómeno. Un aumento de la temperatura ambiente da lugar a mayores temperaturas de los conductores y, con ello, mayores residuos normalizados como consecuencia de la estimación de estado, tal y como refleja la *Tabla 50*. En esta situación, los residuos normalizados no son tan significativos como en el caso anterior.

Tabla 51: RN del área 3 (A3) según temperaturas ambiente.

A3	T. frías		T. suaves		T. cálidas	
		RN		RN		RN
	Q13-12	0,2	Q12-11	0,4	Q14-47	0,8
	Q12-11	0,2	Q11-12	0,4	Q17-14	0,8
	Q12-13	0,2	Q11-19	0,3	Q13-12	0,7
	Q10-9,1	0,2	Q19-11	0,3	Q12-13	0,7
	Q11-12	0,2	Q10-9	0,2	Q12-11	0,5
	Q10	0,2	Q10	0,2	Q11-12	0,4

Finalmente, en el área 3 también se produce el mismo fenómeno (ver *Tabla 51*).

8.2. Temperatura Ambiente Escalonada

En este apartado, se plantea tomar unas temperaturas ambiente de forma más ordenada, es decir, tomando un criterio geográfico según la ubicación de la red en Australia. El criterio a seguir será considerar que los nudos más al sur tendrán temperaturas más frías, mientras que los nudos más norte presentarán temperaturas más cálidas dentro de una misma área. Cada zona se analizará de forma independiente. Se mantiene el rango de temperaturas según las estaciones de año establecido en el apartado 4.7.

Se analizarán los siguientes escenarios: A1 con temperaturas cálidas, A3 con temperaturas suaves y A2 con temperaturas frías. Todas las temperaturas escalonadas según el criterio anteriormente establecido. A diferencia del apartado anterior, donde las temperaturas son establecidas de forma aleatorias dentro del rango de cálidas, suaves y frías, en este las temperaturas ascienden o descienden gradualmente según el criterio establecido.

Nota: Pese a establecer las temperaturas de forma gradual, siempre se mantienen en los rangos de temperaturas establecidos en la *Tabla 26*.

8.2.1 Área 1 con Temperaturas Cálidas

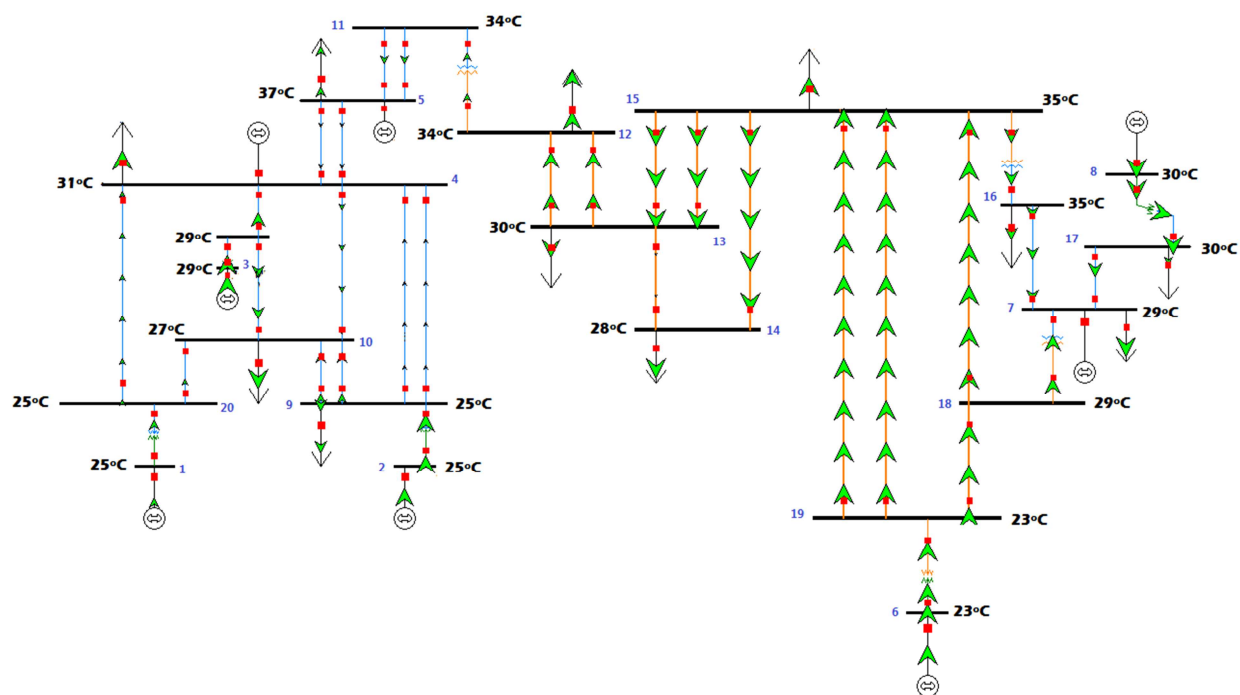


Ilustración 71: Temperaturas ambiente cálidas área 1 (A1).

Se realiza la correspondiente estimación de estado aplicando el modelo de segmentación presentado en el este documento, obteniéndose los residuos normalizados mostrados en la *Tabla 52*.

Tabla 52: RN área 1 (A1).

	A1
Q5	1,1
Q5-4,0	0,8
Q5-4,1	0,8
Q4	0,6
Q4-5,0	0,6
Q4-5,1	0,6

La temperatura de los conductores se muestra en la *Ilustración 72*:

T_cond =			
1	20	0	49.216
20	22	0	32.804
22	4	0	34.27
20	23	0	32.052
23	10	0	32.493
2	9	0	63.308
9	24	0	32.567
24	10	0	33.83
9	25	1	32.567
25	10	1	33.83
9	26	0	32.605
26	4	0	34.12
9	27	1	32.605
27	4	1	34.12
10	28	0	34.11
28	4	0	35.103
3	21	0	60.728
21	29	0	34.78
29	10	0	34.302
21	30	0	36.501
30	4	0	37.005
4	31	0	58.483
31	5	0	60.377
4	32	1	58.483
32	5	1	60.377
5	33	0	44.254
33	11	0	45.364
5	34	1	44.254
34	11	1	45.364
11	12	0	26.376
12	35	0	39.116
35	13	0	38.137
12	36	1	39.116
36	13	1	38.137
13	37	0	35.533
37	14	0	35.045
14	38	0	35.821
38	15	0	37.531
13	39	0	37.309
39	15	0	38.531
13	40	1	37.309
40	15	1	38.531
15	41	0	38.005
41	19	0	35.074
15	42	1	38.005
42	19	1	35.074
6	19	0	49.811
19	43	0	29.939
43	18	0	30.665
18	44	0	34.359
44	15	0	36.556
18	7	0	36.757
16	45	0	36.845
45	7	0	36.341
15	16	0	36.58
17	46	0	37.164
46	7	0	36.873
8	17	0	52.193

Ilustración 72: Temperaturas de los conductores área 1 (A1).

Nota: En la ilustraciones presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

En esta situación, los residuos normalizados son significativos, ya que en alguna medida supera la unidad y aproximadamente 20 medidas superan el residuo normalizado de 0.3. (Ver *Ilustración 73*). Por tanto, cuando las temperaturas son cálidas, parece que la temperatura del conductor tiene mayor importancia en la estimación de estado.

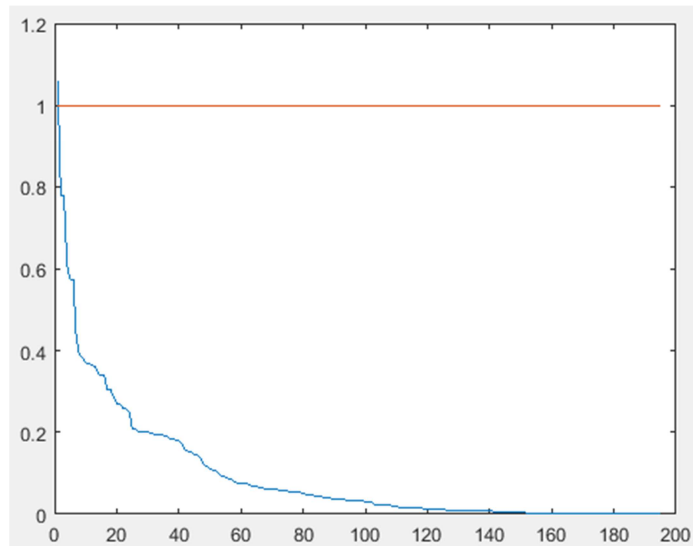


Ilustración 73: Número de medidas y residuos normalizados A1.

8.2.2 Área 3 con Temperaturas Suaves

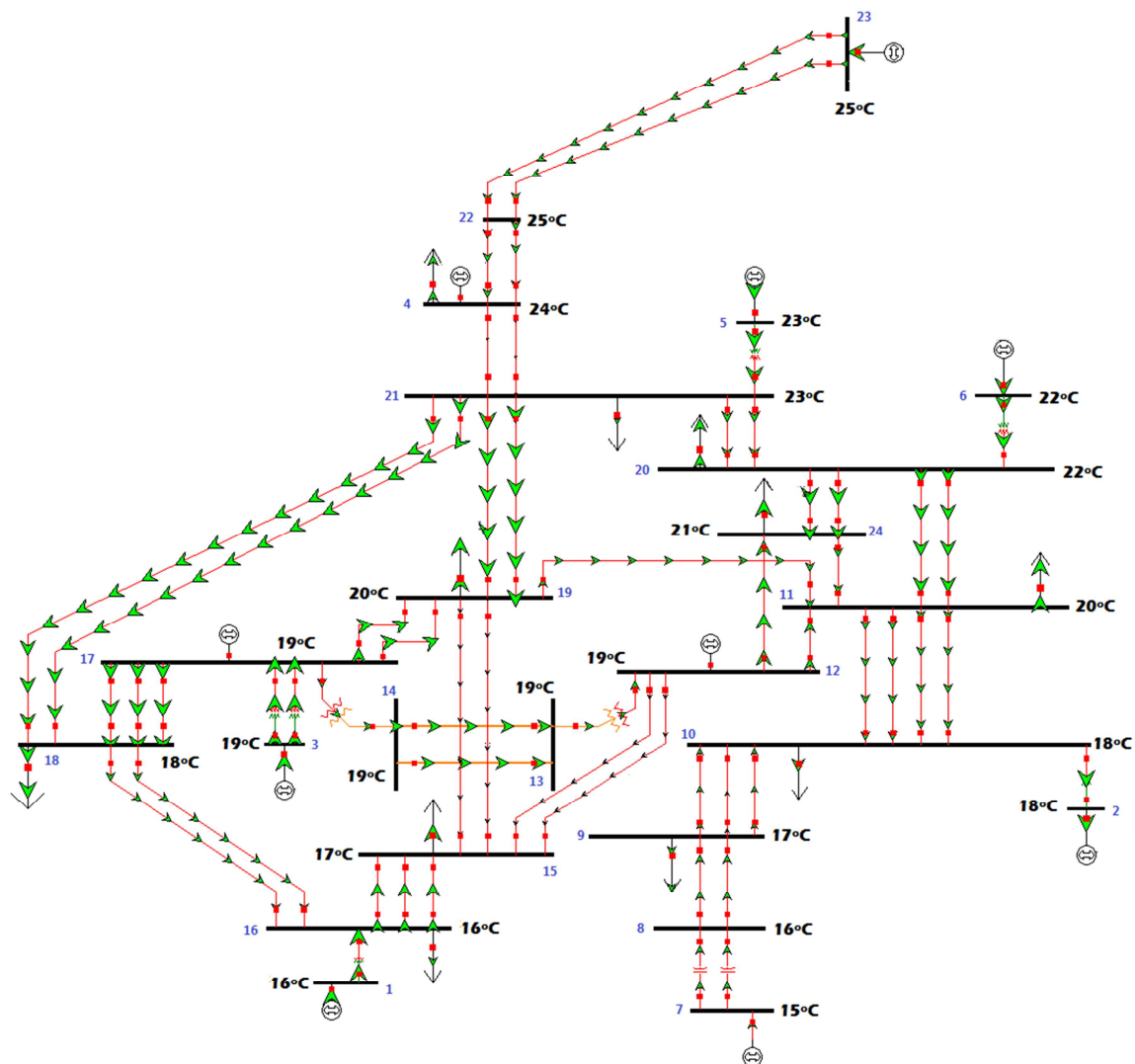


Ilustración 74: Temperaturas ambiente cálidas área 3 (A3).

Tras realizar la estimación de estado se obtuvieron los residuos normalizados expuestos en la *Tabla 48*.

Tabla 53: RN área 3 (A3).

	A3
	RN
Q14-17	0,3
Q17-14	0,3
V23	0,3
V22	0,3
Q12-11	0,3
Q11-12	0,2

Con las siguientes temperaturas de los segmentos en los que se dividen las líneas (ver *Ilustración 75*).

T_cond =			
23	25	0	31.531
25	22	0	31.577
23	26	1	31.531
26	22	1	31.577
22	27	0	32.708
27	4	0	32.69
22	28	1	32.708
28	4	1	32.69
4	29	0	48.781
29	21	0	48.062
4	30	1	48.781
30	21	1	48.062
5	21	0	42.961
21	31	0	31.577
31	20	0	30.861
21	32	1	31.577
32	20	1	30.861
6	20	0	55.573
20	33	0	29.311
33	24	0	29.368
20	34	1	29.311
34	24	1	29.368
24	35	0	33.001
35	11	0	32.292
20	36	0	28.251
36	11	0	27.735
20	37	1	28.251
37	11	1	27.735
21	38	0	30.353
38	18	0	29.202
21	39	1	30.353
39	18	1	29.202
21	40	0	29.199
40	19	0	28.5
21	41	1	29.199
41	19	1	28.5
19	42	0	29.435
42	11	0	29.254
12	43	0	28.417
43	24	0	28.888
12	44	0	37.216
44	11	0	37.004
11	45	0	29.084
45	10	0	28.318
11	46	1	29.084
46	10	1	28.318
11	47	2	29.425
47	10	2	28.547
11	48	3	29.425
48	10	3	28.547
2	10	0	38.346
10	49	0	27.613
49	9	0	27.085
10	50	1	28.728
50	9	1	25.152
10	51	2	27.613
51	9	2	27.085
9	52	0	24.444
52	8	0	23.53
9	53	1	24.444
53	8	1	23.53
8	54	0	22.111
54	7	0	21.867
8	55	1	22.111
55	7	1	21.867
17	56	0	32.68
56	19	0	32.626
17	57	1	32.68
57	19	1	32.626
17	58	0	28.127
58	18	0	27.832
17	59	1	28.127
59	18	1	27.832
17	60	2	28.127
60	18	2	27.832
3	17	0	104.95

Ilustración 75: Temperaturas de los conductores área 3 (A3).

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

En esta situación, las temperaturas de los conductores son menores que en la situación expuesta en el apartado anterior, por tanto, los residuos normalizados son menores. No obstante, el número de medidas por encima de 0.3 desciende considerablemente. Concretamente, sólo cuatro medidas presentan un residuo por encima de dicho valor. (Ver *Ilustración 76*). Por tanto, en esta situación no parece tan importante el efecto de la temperatura en la estimación de estado. Sin embargo, en otra situación donde el nivel de carga es más alto o los valores de las resistencias son elevados, se podrían obtener residuos normalizados más significativos.

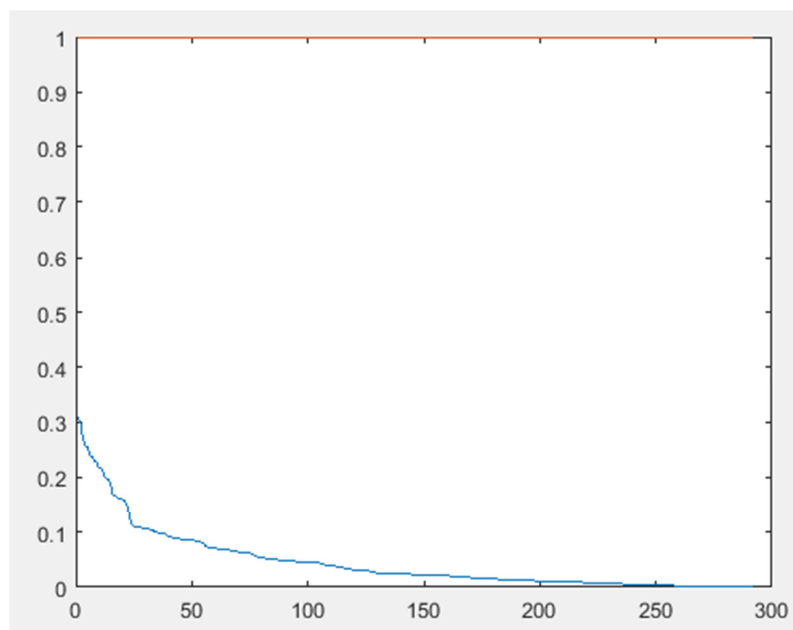


Ilustración 76: Número de medidas y residuos normalizados A3.

8.2.3 Área 2 con Temperaturas Frías

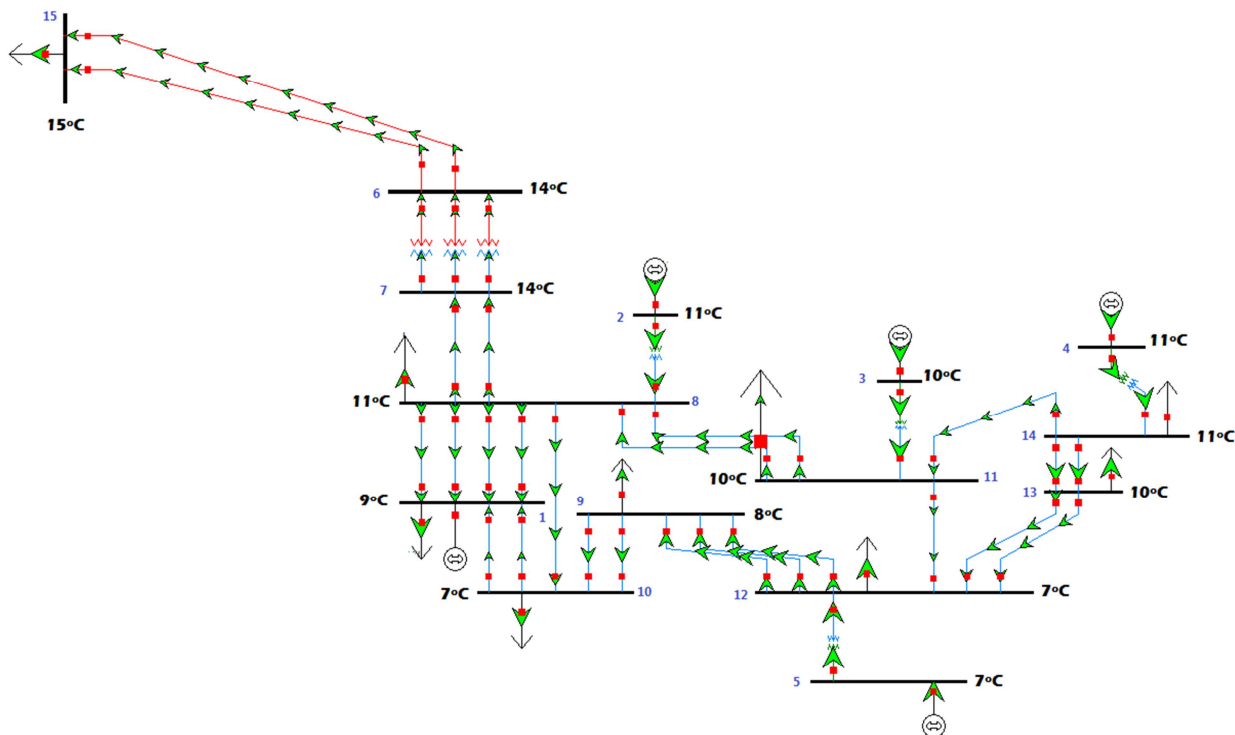


Ilustración 77: Temperaturas ambiente cálidas área 2 (A2).

Finalmente, cuando las temperaturas del ambiente son frías, los residuos normalizados consecuencia de la estimación de estado son los que se muestran en la *Tabla 54*.

Tabla 54: RN área 2 (A2).

A2	
RN	
Q11-8,0	0,2
Q11-8,1	0,2
Q11	0,1
Q11-12	0,1
Q12-11	0,1
Q8-11	0,1

Las temperaturas de los segmentos de las líneas de la red se muestran en la *Ilustración78*.

T_cond =			
5	12	0	25.508
4	14	0	25.508
14	16	0	17.328
16	13	0	17.083
14	17	1	17.328
17	13	1	17.083
14	18	0	18.103
18	11	0	17.867
13	19	0	15.857
19	12	0	15.118
13	20	1	15.857
20	12	1	15.118
11	21	0	16.588
21	12	0	15.814
3	11	0	63.908
11	22	0	19.435
22	8	0	19.832
11	23	1	19.435
23	8	1	19.832
12	24	0	15.502
24	9	0	16.053
12	25	1	15.502
25	9	1	16.053
12	26	2	15.502
26	9	2	16.053
9	27	0	30.125
27	10	0	30.33
9	28	1	30.125
28	10	1	30.33
8	29	0	16.703
29	10	0	15.783
10	30	0	18.209
30	1	0	18.717
10	31	1	18.209
31	1	1	18.717
8	32	0	19.005
32	1	0	18.633
8	33	1	19.005
33	1	1	18.633
8	34	2	19.005
34	1	2	18.633
8	35	3	19.005
35	1	3	18.633
8	36	0	19.644
36	7	0	20.287
8	37	1	19.644
37	7	1	20.287
2	8	0	64.576
7	6	0	32.999
7	6	1	32.999
7	6	2	32.999
6	38	0	21.717
38	15	0	21.681
6	39	1	21.717
39	15	1	21.681

Ilustración 78: Temperaturas de los conductores área 2 (A2).

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

En esta situación, donde pese a que la temperatura ambiente se encuentra entre los 5 y 15°C, el nivel de carga hace que la temperatura de los conductores se encuentre en torno a los 20°C, por tanto, los residuos normalizados son reducidos.

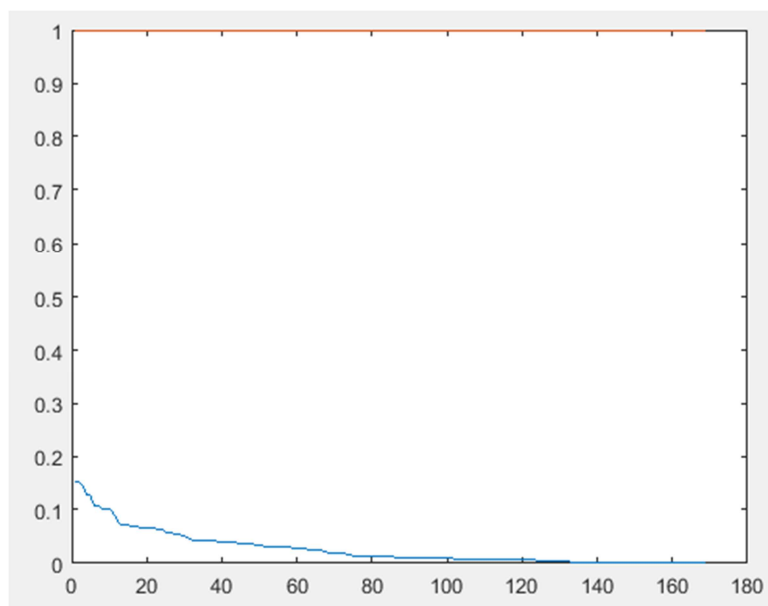


Ilustración 79: Número de medidas y residuos normalizados A2.

9 MODELO SIMPLIFICADO

Después de los ensayos presentados en el presente estudio, parece evidente la necesidad de tener en consideración la temperatura de los conductores para el modelo topológico de la red en la estimación de estado. El principal inconveniente es que si se pretende aplicar a sistemas reales, donde el número de líneas y nudos es elevado, segmentar la para calcular las temperaturas y realizar una estimación de estado supone un tiempo de ejecución muy elevado, lo cual imposibilita dicha aplicación.

Por ello, en este apartado se plantea un modelo simplificado que permita calcular la temperatura de los conductores sin necesidad de segmentar la red ni aplicar un proceso iterativo que calcule de forma exacta la temperatura de los mismos.

El modelo propuesto calcula de forma aproximada la temperatura a la que se encuentran los conductores de la red original a partir de un conjunto completo de medidas, las cuales son tomadas en unas condiciones determinadas de temperatura y carga. Una vez obtenidas, se modifica el valor de las resistencias según la *ecuación 34* y se obtiene un modelo topológico de la red con valores de la resistencia aproximado al real (ver *Ilustración 80*).

De esta forma, aunque probablemente se sigan obteniendo medidas con ciertos residuos normalizados, el valor de los mismos será más reducido que si se aplica el modelo de estimación de estado convencional.

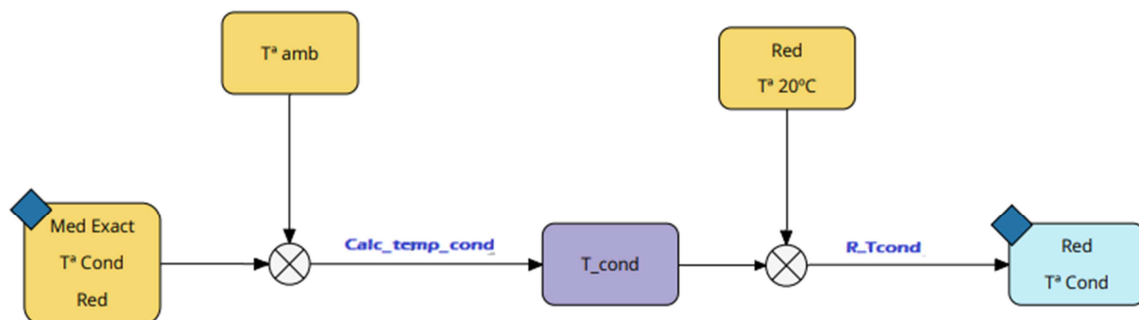


Ilustración 80: Diagrama de bloques y funciones del modelo simplificado.

El modelo de cálculo de la temperatura del conductor es el mismo que se emplea en el apartado 3.3.

En los siguientes apartados se realizarán algunos ensayos donde se compruebe que, al tomar en consideración una temperatura de conductores aproximada, se puede reducir considerablemente los residuos normalizados en la estimación de estado. Y además, se compara con el modelo de segmentación que sí modifica las

temperaturas de las resistencias del modelo topológico de la red.

Nota: Esta última estimación de estado sería, a priori, la más exacta que se puede alcanzar con el modelo de segmentación propuesto. Ya que considera la temperatura de los conductores en la valoración de las resistencias en el modelo topológico y, además, dichas temperaturas se calculan teniendo en cuenta la segmentación de la red, lo cual permite mayor precisión en la estimación de las temperaturas.

Para esclarecer mejor los resultados, se presentan de forma comparativa los residuos normalizados para la estimación de estado convencional, que no considera la temperatura en el modelo topológico de la red, y la que considera una temperatura de los conductores aproximada. Además, se compara con el modelo de estimación de estado que modifica la temperatura de las resistencias aplicando el modelo de segmentación que presentará residuos normalizados prácticamente nulos.

Se pretende con esto obtener una solución que considere las temperaturas de los conductores de forma aproximada, que se obtengan residuos normalizados suficientemente bajos y con coste computacional reducido.

Nota: El modelo exacto se realizará con dos divisiones con el fin de no elevar la cuantía de los resultados mostrados.

9.1. Red IEEE14 con Temperaturas Suaves

En este apartado se somete la red IEEE14 a un estado de temperaturas ambiente aleatorias dentro del rango de temperaturas suaves establecido en el apartado 4.7. La red a evaluar es la representada en la *Ilustración 2*.

Las temperaturas ambiente a la que se encuentran los nudos de la red se muestran en la *Tabla 55*.

Tabla 55: Temperaturas ambiente de la red IEEE14.

Nudos	Temp_amb (°C)
1	22
2	24
3	12
4	24
5	19
6	19
7	24
8	24
9	24
10	24
11	12
12	25

13	24
14	17

Tras realizar las tres estimaciones de estado pertinentes (uno con cada modelo), se comparan los residuos normalizados obtenidos en cada una de las situaciones. A priori, cabe esperar que el modelo que considera la temperatura de los conductores sin segmentar la red (simplificado) presente menores residuos normalizados que el modelo de estimación de estado que no la considera (convencional), pero mayores residuos que el modelo exacto que considera la temperatura de los conductores mediante segmentación de las líneas.

Nota: El modelo exacto, no implica que los otros modelos no sean buenos o válidos. Este modelo obtiene de la forma más realista posible la temperatura de los conductores a partir de una segmentación de las líneas. Así, la temperatura ambiente de la línea total no es la media de sus extremos, sino un escalonamiento lineal de dicha temperatura a lo largo de la línea considerando como límites las temperaturas ambiente de sus nudos extremos.

Los residuos normalizados obtenidos se muestran en la *Tabla 56*.

Tabla 56: RN de la red IEEE14 comparando los tres modelos.

Convencional	RN	Simplificado	RN	Exacto	RN
V2	2	Q1-5	0,1	P5-1	0
P2-1	0,5	Q4-2	0,1	P1-5	0
P1	0,4	Q2-4	0,1	V1	0
Q	0,3	Q5-1	0,1	Q5-1	0
P1-5	0,3	Q2-1	0,1	Q3	0
V3	0,3	Q13-14	0,1	Q5	0

Tal y como se observa, el modelo convencional de estimación de estado presenta residuos normalizados significativos al no considerar la temperatura de los conductores en la misma. Por otro lado, el modelo exacto, tal y como era de esperar, no presenta residuos algunos, mientras que el modelo simplificado, aunque sí presenta ciertos residuos, estos valores son pequeños y mucho menores que la estimación convencional.

El número de medidas que presentan residuos normalizados no nulos, se analiza mediante la *Ilustración 81*.

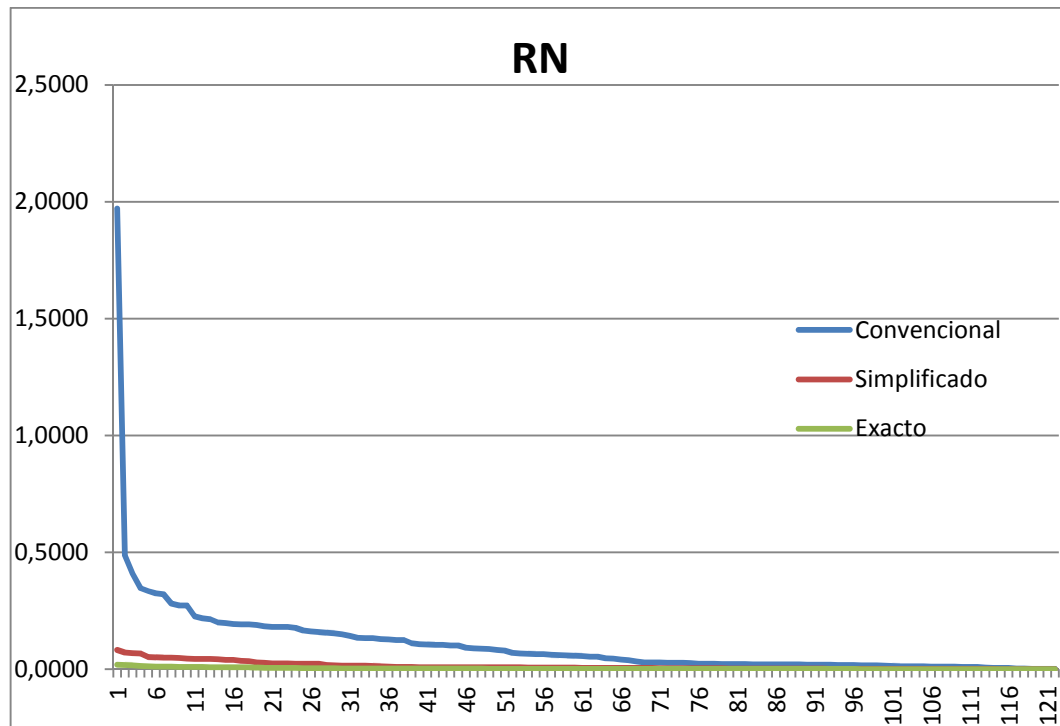


Ilustración 81: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE14.

La gráfica establece de forma clara, no solo en cuanto a valor de los residuos normalizados según el modelo que se emplee, sino del número de medidas que presentan valores no nulos. El modelo convencional presenta aproximadamente 81 medidas con residuos no nulos, mientras que el modelo simplificado en torno a 30. Además, los valores del primero son mucho mayores que el segundo.

Resulta llamativa la proximidad de las curvas de residuos normalizados del modelo simplificado con respecto al modelo exacto, aunque el número de medidas con residuos no nulos si es distinto. El modelo exacto, presenta aproximadamente 5 medidas con residuos distintos de cero, mientras que el modelo simplificado, 30.

Nota: Tal y como se explicó en apartados previos, el modelo de segmentación presenta diferencias topológicas con respecto al modelo original debido a la segmentación con presencia de susceptancia en paralelo. Es por ello que el modelo exacto presenta algunas medidas con residuos pequeños.

¿A qué se debe la diferencia de residuos existente ente el modelo simplificado y exacto?

Para enfocar esta pregunta hay que analizar temperaturas estimadas por cada uno de los modelos.

T_cond =				T_cond =			
1	15	0	93.253	1	2	0	92.295
15	2	0	93.358	1	5	0	88.083
1	16	0	91.364	2	3	0	45.221
16	5	0	90.893	2	4	0	42.465
2	17	0	48.658	2	5	0	42.268
17	3	0	45.994	3	4	0	27.495
2	18	0	42.728	4	5	0	32.06
18	4	0	42.689	4	7	0	62.188
2	19	0	43.769	4	9	0	35.934
19	5	0	42.655	5	6	0	113.29
3	20	0	24.716	6	11	0	19.143
20	4	0	27.699	6	12	0	25.025
4	21	0	33.451	6	13	0	28.158
21	5	0	32.277	7	8	0	36.677
4	7	0	62.067	7	9	0	59.46
4	9	0	35.931	9	10	0	29.923
5	6	0	113.41	9	14	0	29.328
6	22	0	18.954	10	11	0	23.898
22	11	0	19.197	12	13	0	29.867
6	23	0	21.654	13	14	0	28.337
23	12	0	25.063				
6	24	0	25.143				
24	13	0	28.265				
7	8	0	36.662				
7	9	0	59.53				
9	25	0	29.953				
25	10	0	29.953				
9	26	0	31.158				
26	14	0	29.465				
10	27	0	26.853				
27	11	0	23.918				
12	28	0	30.12				
28	13	0	29.875				
13	29	0	30.108				
29	14	0	28.408				

Ilustración 82: Temperaturas de los conductores de la red IEEE14 segmentada del modelo convencional y las del modelo simplificado.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada y de la red sin segmentar. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

En la *Ilustración 82* se aprecian las diferencias de temperaturas de cada rama según el modelo. En la primera columna se muestran las temperaturas de los conductores de la red segmentada del modelo exacto y en la segunda, la temperatura de la red sin segmentar del modelo simplificado. Por ejemplo, si se considera la rama 1-2 del modelo simplificado (1-15 y 15-2 en la red segmentada), en el modelo exacto la temperatura ronda los 93°C, mientras que en el modelo simplificado, 92°C. Esta diferencia de temperatura se traduce en valores distintos de las resistencias en el modelo topológico y, en consecuencia, residuos normalizados distintos de cero en el modelo simplificado.

Con el fin de determinar hasta qué punto es notable la diferencia entre el modelo simplificado y el exacto con segmentación de la red, se muestran a continuación los valores de las resistencias de cada modelo tras haber sido modificadas con las temperaturas.

Tabla 57: Comparación de resistencias de la red IEEE14 aplicando el modelo exacto y simplificado.

Nudo origen	Nudo destino	Circuito	R del modelo exacto	R del modelo simplificado
1	2	0	0.0251	0.0250
1	5	0	0.0696	0.0688
2	3	0	0.0521	0.0517
2	4	0	0.0634	0.0633
2	5	0	0.0622	0.0620
3	4	0	0.0686	0.0690
4	5	0	0.0140	0.0139
4	7	0	0.0000	0.0000
4	9	0	0.0000	0.0000
5	6	0	0.0000	0.0000
6	11	0	0.0946	0.0946
6	12	0	0.1245	0.1253
6	13	0	0.0679	0.0683
7	8	0	0.0000	0.0000
7	9	0	0.0000	0.0000
9	10	0	0.0330	0.0330
9	14	0	0.1323	0.1318
10	11	0	0.0838	0.0833
12	13	0	0.2298	0.2297
13	14	0	0.1773	0.1766

Tal y como se observa en la *Tabla 57*, los valores de las resistencias, tras haber sido modificadas según la temperatura del conductor con la *ecuación 34*, son muy similares. La diferencia entre unas y otras se aprecia a partir de la cuarta cifra decimal, por tanto, parece ser que el modelo simplificado da una buena aproximación del modelo de temperaturas y topológico de la red.

9.2. Red IEEE24 con Temperaturas Frías

Al igual que en el apartado anterior, se realiza el mismo análisis considerando la red IEEE24 (ver *Ilustración 7*), la cual se desenvuelve en un ambiente de temperaturas frías. Dichas temperaturas se reflejan en la *Tabla 58*.

Tabla 58: Temperaturas ambiente de la red IEEE24.

Nudos	Temp_amb (°C)
1	12
2	2
3	6
4	14
5	12
6	14
7	10
8	1
9	13
10	12
11	12
12	12
13	11
14	6
15	10
16	3
17	11
18	0
19	4
20	1
21	1
22	12
23	10
24	6

Se realizan las estimaciones de estado correspondientes a cada uno de los modelos obteniéndose los resultados de la *Tabla 59*.

Tabla 59: RN de la red IEEE24 comparando los tres modelos.

Convencional	RN	Simplificado	RN	Exacto	RN
Q16-15	0,9	Q17-22	0,1	Q17-22	0,1
Q13-23	0,9	Q22-21	0,1	Q22-21	0,1
Q23-13	0,9	Q22-17	0,1	Q22-17	0,1
Q15-16	0,9	P17-22	0,1	Q17	0,1
Q3-4	0,8	P22-17	0,1	Q21-22	0,1
Q24-3	0,8	P22-21	0,1	P12-23	0,1

Se obtienen los mismo resultados que en el caso anterior: el modelo simplificado presenta menores residuos normalizados que el modelo convencional, con la diferencia que los residuos normalizados del modelo exacto son del mismo orden de magnitud que los del modelo simplificado. En esta ocasión, las diferencias topológicas debido a la susceptancia en paralelo en la segmentación del modelo exacto presentan unos

residuos algo mayores, pero próximos a cero.

Para apreciar mejor la diferencia entre los tres modelos se presenta la siguiente gráfica:

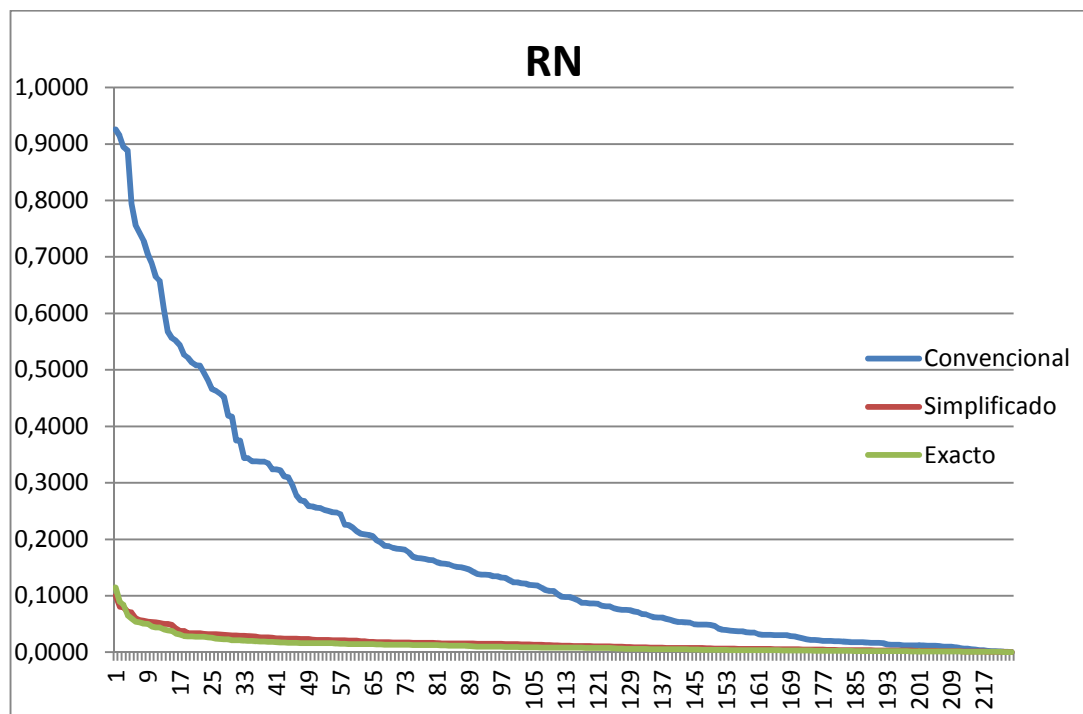


Ilustración 83: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE24.

La diferencia de los residuos entre el modelo convencional y el simplificado es muy significativa. Con el nuevo modelo, aunque se considere la temperatura de los conductores de forma aproximada, se obtienen valores de los residuos aceptables, incluso, en esta situación la diferencia con el modelo exacto es mínima.

T_cond =

1	25	0	15.63
25	2	0	13.189
3	26	0	35.689
26	1	0	37.593
1	27	0	20.975
27	5	0	20.848
2	28	0	12.662
28	4	0	15.294
2	29	0	14.184
29	6	0	16.542
3	30	0	48.412
30	4	0	50.143
24	3	0	129.87
4	31	0	34.565
31	9	0	33.065
5	32	0	21.704
32	10	0	22.186
10	33	0	44.715
33	6	0	42.164
7	34	0	14.25
34	8	0	11.989
8	35	0	22.175
35	9	0	24.578
8	36	0	24.062
36	10	0	24.576
11	9	0	96.079
9	12	0	48.748
11	10	0	106.5
12	10	0	91.057
11	37	0	40.116
37	14	0	39.077
11	38	0	18.04
38	13	0	18.266
12	39	0	22.606
39	13	0	22.577
12	40	0	36.919
40	23	0	36.237
23	41	0	26.354
41	13	0	26.924
14	42	0	44.378
42	16	0	43.556
15	43	0	67.468
43	24	0	67.344
15	44	0	15.538
44	21	0	13.256
15	45	1	15.538
45	21	1	13.256
16	46	0	12.249
46	15	0	13.93
16	47	0	20.862
47	19	0	21.146
16	48	0	73.737
48	17	0	74.865
17	49	0	21.123
49	18	0	18.501
17	50	0	24.025
50	22	0	23.343
18	51	0	10.567
51	21	0	10.756
18	52	1	10.567
52	21	1	10.756
19	53	0	11.874
53	20	0	11.213
19	54	1	11.874
54	20	1	11.213
20	55	0	10.079
55	23	0	12.291
20	56	1	10.079
56	23	1	12.291
21	57	0	30.523
57	22	0	30.783

T_cond =

1	2	0	13.159
3	1	0	37.449
1	5	0	20.704
2	4	0	15.36
2	6	0	16.813
3	4	0	51.052
24	3	0	129.87
4	9	0	32.749
5	10	0	22.093
10	6	0	45.917
7	8	0	12.058
8	9	0	25.13
8	10	0	27.3
11	9	0	95.975
9	12	0	48.717
11	10	0	106.89
12	10	0	91.304
11	14	0	39.564
11	13	0	18.294
12	13	0	22.67
12	23	0	36.891
23	13	0	26.714
14	16	0	44.19
15	24	0	67.235
15	21	0	13.365
15	21	1	13.365
16	15	0	13.963
16	19	0	21.253
16	17	0	76.379
17	18	0	18.558
17	22	0	24.339
18	21	0	10.857
18	21	1	10.857
19	20	0	11.174
19	20	1	11.174
20	23	0	12.265
20	23	1	12.265
21	22	0	33.392

Ilustración 84: Temperaturas de los conductores de la red IEEE24 segmentada del modelo convencional y las del modelo simplificado.

Nota: En la ilustración se presenta la temperatura de la red segmentada y de la red sin segmentar. También se observa diferencias en las temperaturas de los segmentos que forman la misma línea (ver apartado 3.4).

Aunque en esta situación las temperaturas de los conductores también difieren entre la que se obtiene mediante un modelo u otro, el efecto de la susceptancia hace que los valores de los residuos tengan el mismo orden de

magnitud (ver *Ilustración 84*). Por tanto, con ambos modelos se obtendrían resultados similares.

A continuación, en la *Tabla 60*, se repite la misma comparación de las resistencias de los modelos exacto y simplificado llevada a cabo en el apartado anterior.

Tabla 60: Comparación de resistencias de la red IEEE24 aplicando el modelo exacto y simplificado.

Nudo origen	Nudo destino	Circuito	R del modelo exacto	R del modelo simplificado
1	2	0	0.00068	0.00068
3	1	0	0.05781	0.05799
1	5	0	0.02250	0.02248
2	4	0	0.03279	0.03298
2	6	0	0.04969	0.04998
3	4	0	0.03518	0.03541
24	3	0	0.00331	0.00331
4	9	0	0.02843	0.02830
5	10	0	0.02352	0.02353
10	6	0	0.02474	0.02497
7	8	0	0.01569	0.01562
8	9	0	0.04291	0.04321
8	10	0	0.04324	0.04358
11	9	0	0.00300	0.00300
9	12	0	0.00256	0.00256
11	10	0	0.00310	0.00310
12	10	0	0.00295	0.00296
11	14	0	0.00553	0.00553
11	13	0	0.00578	0.00579
12	13	0	0.00589	0.00589
12	23	0	0.01306	0.01307
23	13	0	0.01088	0.01088
14	16	0	0.00523	0.00523
15	24	0	0.00764	0.00764
15	21	0	0.00593	0.00590
15	21	1	0.00593	0.00590
16	15	0	0.00206	0.00207
16	19	0	0.00284	0.00284
16	17	0	0.00387	0.00390
17	18	0	0.00176	0.00175
17	22	0	0.01243	0.01246
18	21	0	0.00318	0.00318
18	21	1	0.00318	0.00318
19	20	0	0.00487	0.00487
19	20	1	0.00487	0.00487
20	23	0	0.00266	0.00267
20	23	1	0.00266	0.00267
21	22	0	0.00865	0.00874

En este caso, las diferencias entre las resistencias empleando un modelo u otro no se aprecian hasta la cuarta o quinta cifra decimal. Ello da a entender que el modelo topológico obtenido con el modelo simplificado de temperaturas del conductor presenta muy buenos resultados en comparación con el modelo exacto.

9.3. Red IEEE30 con Temperaturas Cálidas

En este apartado, se somete la red IEEE30 (ver *Ilustración 54*) a un escenario de temperaturas ambientes más adversas, al ser estas más altas. Por tanto, se espera que la diferencia entre el modelo exacto y simplificado sea algo más significativa.

Las temperaturas ambiente se muestran en la *Tabla 61*.

Tabla 61: Temperaturas ambiente de la red IEEE30.

Nudos	Temp_amb (°C)
1	40
2	43
3	23
4	43
5	36
6	22
7	27
8	34
9	44
10	44
11	24
12	44
13	44
14	32
15	40
16	24
17	31
18	43
19	40
20	44
21	36
22	21
23	41
24	43
25	37
26	39
27	39
28	30
29	36
30	24

Después de realizar las estimaciones de estado correspondientes a cada uno de los modelos obteniéndose los

resultados reflejados en la *Tabla 62*.

Tabla 62: RN de la red IEEE30 comparando los tres modelos.

Convencional	RN	Simplificado	RN	Exacto	RN
Q11-7	1,9	Q10-12	0,2	P5-2	0
Q11-12	1,6	Q11-10	0,2	v1	0
Q12-11	1,5	Q12-10	0,2	P2-5	0
V1	1,2	Q10-11	0,1	v2	0
Q18-15	1	Q11-12	0,1	P8-5	0
Q15-18	1	Q12-11	0,1	P5-8	0

Tal y como cabe esperar, la diferencia de los modelos exacto y simplificado con respecto al convencional es, una vez más, importante. El modelo simplificado presenta valores de residuos normalizados pequeños, ya que considera la temperatura de los conductores de forma aproximada, pero dentro de un orden de magnitud aceptable para tal aplicación.

A diferencia de este con los aparatados anteriores, el modelo simplificado presenta residuos algo mayores con respecto al exacto, algunos en torno a 0.2, mientras que el modelo exacto no presenta el efecto de las capacidades en paralelo.

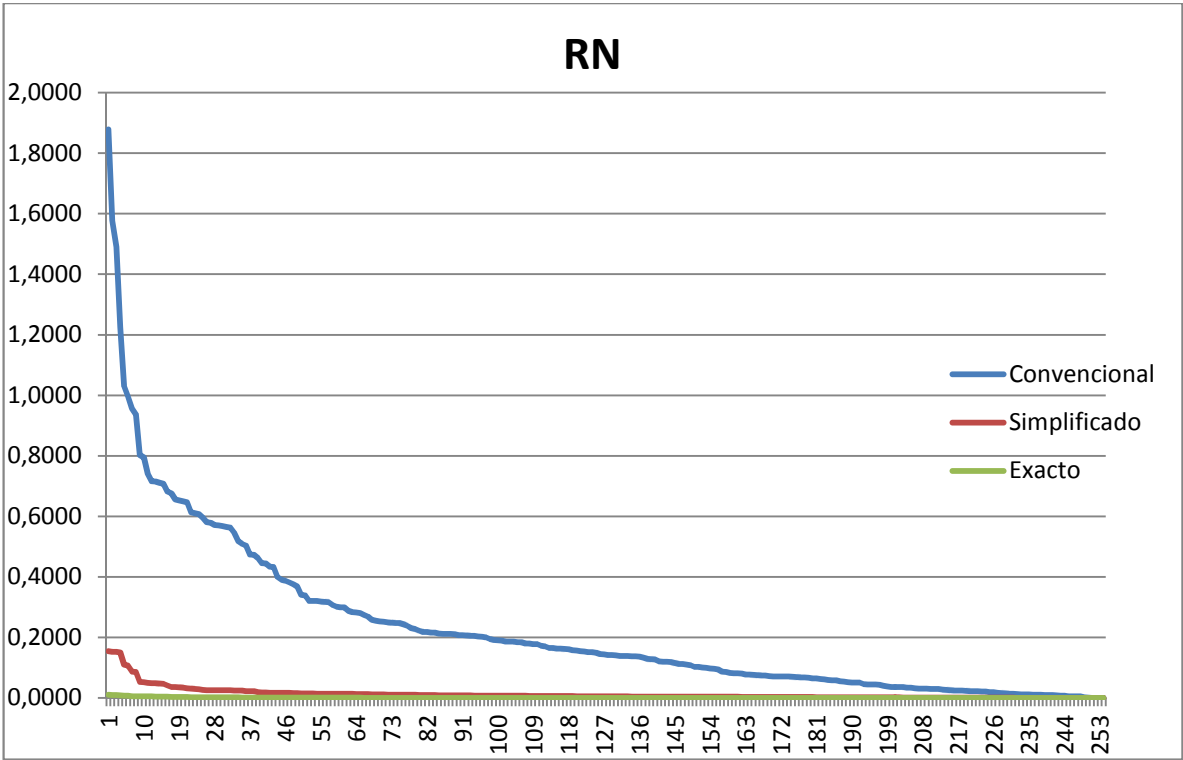


Ilustración 85: Medidas y residuos normalizados de la red IEEE30.

Se repite la misma tendencia de las gráficas anteriores, un elevado número de medidas presentan residuos normalizados elevados en el modelo convencional de estimación de estado. Las curvas del modelo

simplificado y exacto, por el contrario, están muy próximas unas de otras. Sin embargo en esta ocasión las diferencias, aunque mínimas, son más pronunciadas que en los casos anteriores. En el modelo simplificado, aproximadamente 115 medidas son distintas de cero, aunque sólo un 5% supera el valor de 0.1.

Nota: En la gráfica se observa que ningún valor de la curva del modelo simplificado llega a 0.2, no obstante, en la *Tabla 62*, se asigna un valor de 0.2 a los residuos normalizados por motivos de redondeo y claridad a la hora de presentar los resultados.

9.4. Red de 115 kV con Temperaturas Suaves

En este apartado se pretende comprobar los mismos resultados obtenidos anteriormente con una red de 115 kV (ver *Ilustración 50*) y un escenario de temperaturas suaves.

Tabla 63: Temperaturas ambiente de la red de 115 kV.

Nudos	Temp_amb (°C)
1	23
2	14
3	22
4	14
5	24
6	15
7	13
8	14
9	19
10	17

En la *Tabla 64* se recogen los residuos normalizados después de las correspondientes estimaciones de estado.

Tabla 64: RN de la red de 115 KV comparando los tres modelos.

Convencional	RN	Simplificado	RN	Exacto	RN
Q1-2	0,2	Q6-4	0,1	Q6-4	0
Q2-1	0,2	Q4-6	0	Q2-5	0
Q6-4	0,1	Q2-5	0	Q4-6	0
Q4-6	0,1	Q5-2	0	Q5-2	0
Q5-2	0,1	Q4-2	0	Q6	0
Q2-5	0,1	Q2-4	0	Q2	0

En esta situación, los residuos normalizados obtenidos con los tres modelos son pequeños o nulos. Aunque aun

así, el modelo convencional es el que presenta mayores residuos, seguido del modelo simplificado. En este caso, es tan clara la tabla de residuos como la gráfica comparativa de los mismos.

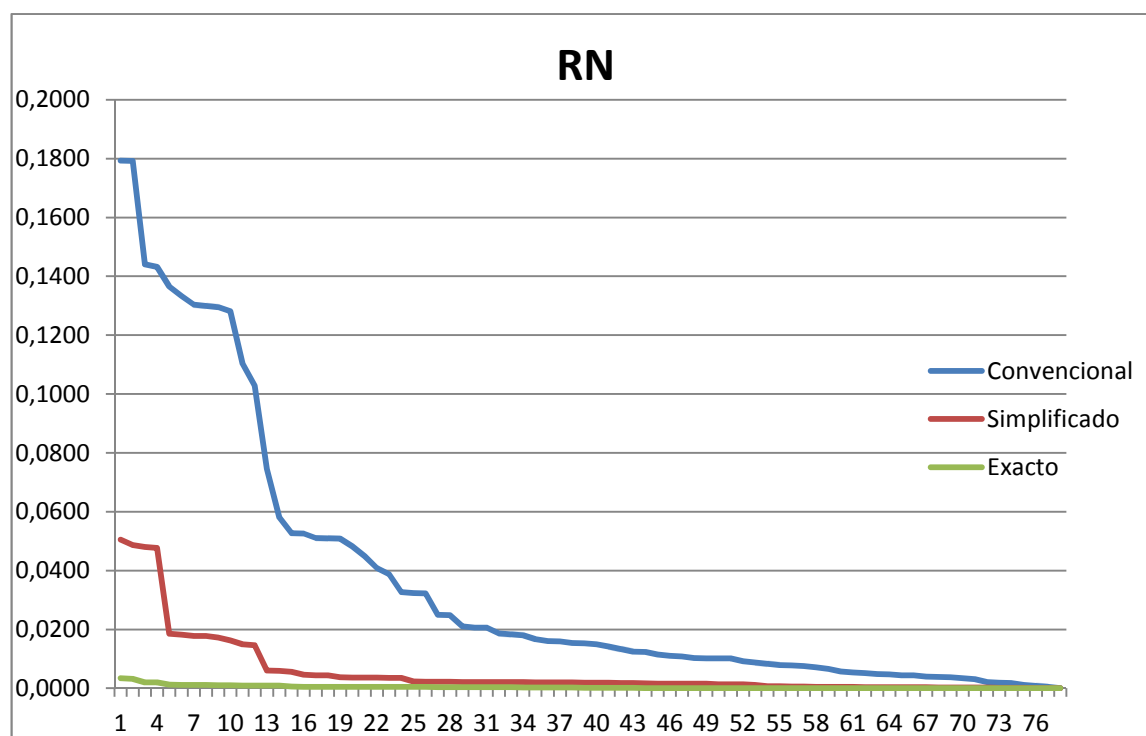


Ilustración 86: Medidas y residuos normalizados de la red de 115 kV.

Si se observa la *Tabla 64*, se aprecia que sigue existiendo diferencia entre el modelo convencional y el exacto o el simplificado. Para llegar a determinar la diferencia entre estos dos últimos modelos, hay que alcanzar un orden de magnitud inferior (0.01). Por lo que parece evidente que se obtienen resultados muy buenos con un modelo aproximado de las temperaturas de los conductores.

9.5. Red de 400 kV con Temperaturas Cálidas

Finalmente, se repiten los mismos ensayos que en los apartados anteriores para una red de 400 kV (ver *Ilustración 52*) en un escenario de temperaturas ambientes cálidas. Dichas temperaturas se recogen en la *Tabla 65*.

Tabla 65: Temperaturas ambiente de la red de 400 kV.

Nudos	Temp_amb (°C)
1	40
2	28
3	33

4	24
5	35
6	27
7	36

A continuación, en la *Tabla 66*, se muestran los residuos normalizados obtenidos de las estimaciones de estado correspondiente a cada modelo:

Tabla 66: RN de la red de 400 kV comparando los tres modelos.

Convencional	RN	Simplificado	RN	Exacto	RN
V1	0,4	Q3-2	0	Q3-1	0
V5	0,3	Q2-4	0	P3-1	0
Q1-3	0,3	Q2-3	0	Q1-3	0
Q2-4	0,2	Q4-2	0	P1-3	0
Q4-2	0,2	Q5-2	0	Q3	0
Q3-1	0,2	V5	0	P2-5	0

Al igual que en el apartado anterior, los resultados son esperados. El modelo simplificado presenta residuos normalizados mucho menores que el modelo convencional. Este, que no considera la temperatura de los conductores en el modelo topológico de la red, presenta residuos normalizados en torno a 0.4 y 0.2. Aunque estos, no son tan altos como en otros ejemplos, el modelo simplificado presenta valores nulos al igual que el modelo exacto.

Para apreciar mejor la diferencia entre estos dos últimos modelos, hay que considerar un orden de magnitud inferior. Para ello, en la siguiente gráfica comparativa de los residuos normalizados de cada modelo se refleja la diferencia existente entre el modelo simplificado y el exacto.

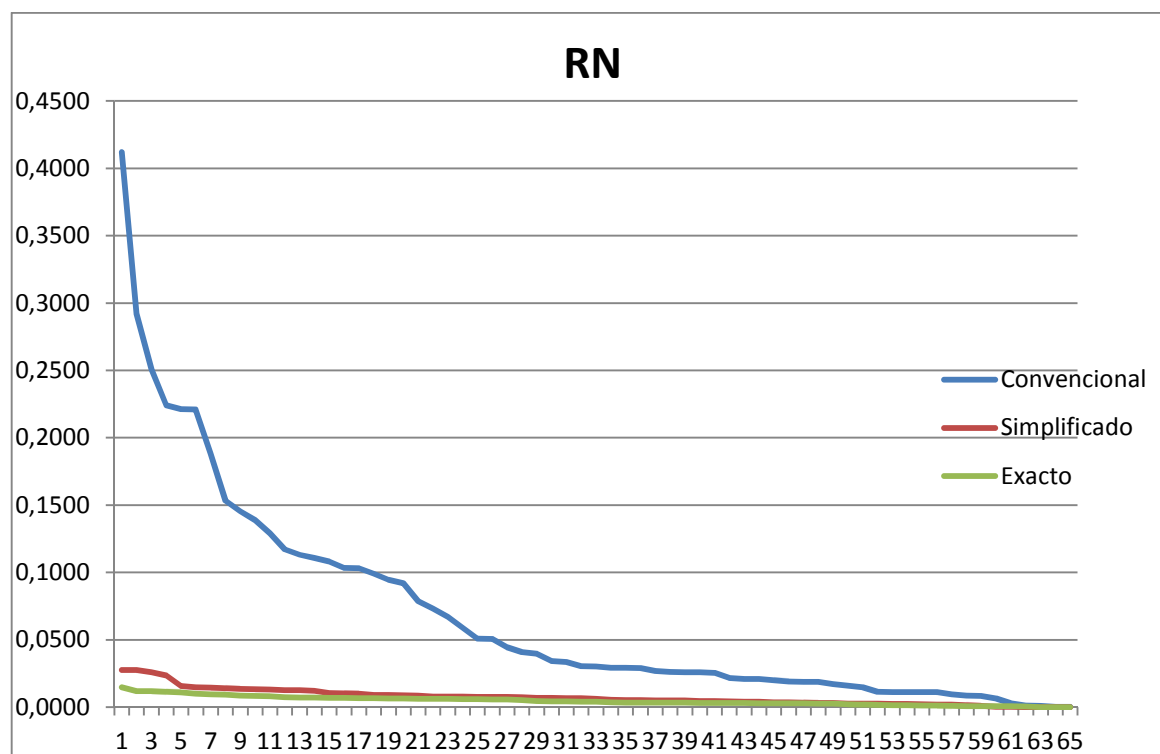


Ilustración 87: Medidas y residuos normalizados de la red de 400 kV.

Tal y como se observa en la *Ilustración 87*, la diferencia entre la estimación de estado convencional y la que emplea un modelo exacto o simplificado de temperaturas es notable, sin embargo, entre estas dos últimas la diferencia es mínima. Dicha diferencia es inferior incluso a 0.03, por lo que puede determinarse que en este caso los resultados obtenidos son prácticamente idénticos.

10 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO SIMPLIFICADO

Habiéndose realizado los ensayos pertinentes, parece que no existe una diferencia significativa entre los residuos normalizados obtenidos de la estimación de estado exacta y la que emplea un modelo simplificado para el cálculo de las temperaturas de las líneas. Por tanto, ¿por qué puede ser preferible emplear un modelo simplificado en vez de un modelo de segmentación más exacto?

El modelo simplificado presenta las siguientes ventajas respecto al modelo exacto:

- Es un modelo mucho más simple ya que no requiere segmentar la red para aumentar así el número de nudos y ramas.
- Emplea un tiempo de cálculo y de estimación de estado mucho menor al ser el modelo más simple y emplear redes con menor número de nudos y líneas.
- Al emplear menor coste computacional es más factible su utilización a tiempo real.
- Como emplea menor modificación de datos, operaciones y no emplea ningún proceso iterativo, dicho modelo presenta menores problemas de mal condicionamiento y estabilidad numérica.
- Estima la temperatura de los conductores con una precisión suficientemente buena como para aproximar un valor de las resistencias de las líneas del modelo topológico muy próximo al real.
- Los residuos normalizados son pequeños y la diferencia con los que presentaría una estimación de estado con un modelo exacto son mínimas.
- No presenta diferencia topológica debido a la susceptancia en paralelo con respecto al modelo tradicional en π .

Nota: Esto no significa que la diferencia topológica debido a dicha susceptancia sea errónea. Sólo establece un nuevo modelo que quizás refleje mejor o no el fenómeno de las capacidades parásitas.

Estas ventajas justificarían el uso del modelo simplificado frente al modelo exacto en cuanto a cálculo de temperatura de los conductores se refiere.

11 CONCLUSIONES FINALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras haber realizado el presente estudio, queda reflejada la importancia que puede llegar a tener la temperatura de los conductores en la estimación de estado, además del impacto significativo que presenta sobre la fiabilidad y precisión de las medidas que se obtienen de los instrumentos de obtención de las mismas.

Durante la realización de este documento:

- Se ha desarrollado una herramienta de estimación de estado que permite obtener las temperaturas de los conductores de líneas de redes eléctricas. En base a esta temperatura, se ha determinado la resistencia eléctrica a la que se encuentran operando las líneas del sistema.
- Se ha implementado un modelo multisegmento de líneas, que permite considerar diferentes tramos en una misma línea a diferentes temperaturas ambientes.
- Como parámetro de entrada el modelo implementado considera las temperaturas ambiente en las subestaciones, estimando la de las líneas o segmentos mediante interpolación lineal entre las temperaturas de los extremos.
- Los resultados obtenidos en las simulaciones muestran como en determinadas condiciones los resultados del estimador pueden quedar contaminados de una manera importante si no se considera la temperatura a la que realmente se encuentran operando las líneas. En ocasiones pueden ser tan significativos los valores de los residuos normalizados que se consideren erróneas medidas que no lo son.
- El modelo multisegmento tiene el inconveniente que aumenta significativamente el número de nudos y líneas (segmentos) de la red, lo cual da lugar a un coste computacional elevado.
- Se ha propuesto un modelo simplificado que considera la temperatura del conductor y que permite obtener unos resultados aceptables en el proceso de estimación, sin necesidad de aumentar el tamaño de la red en cuanto a número de elementos se refiere.

El efecto de la temperatura de los conductores sobre la estimación de estado puede dar lugar a futuras líneas de investigación, como:

- Determinar bajo qué condiciones es necesario considerar un modelo que calcule la temperatura del conductor en el proceso de estimación de estado.
- Realizar un análisis de sensibilidad sobre algunos parámetros que se han considerado constantes en el modelo (velocidad del viento, radiación, etc).
- Estudiar cómo afectaría a la estimación de estado incluir el ruido de las señales además de la temperatura del conductor.
- Determinar el impacto que tendría no disponer de medidas de flujo de potencia en ambos extremos de las líneas además del efecto de la temperatura del conductor.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://icseg.iti.illinois.edu/power-cases/>
- [2] Effect of the Conductor Temperature on the State Estimation of Power Systems. A. de la Villa Jaén, J.C. del Pino López, P. Cruz Romero, Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Sevilla, Jorge Tello Guijarro, Active networks and critical infrastructure, Unión Fenosa Distribución, 2017.
- [3] Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión y sus fundamentos técnicos. - Aplicación al Reglamento de Instalaciones Eléctricas de Alta Tensión - R.D. 337/2014 de 9 de mayo. Fernando Garnacho Vecino, Pacual Simón Cmán, Jorge Moreno Mohíno, Alberto Gonzalez Sanz. Gas Natural Fenosa, 2014.
- [4] <https://www.powerworld.com/knowledge-base/use-spreadsheets-to-create-or-modify-model-objects>
- [5] Power System State and Transmission Line Conductor Temperature Estimation. Chawasak Rakpenthai, Member, IEEE, and Sermsak Uatrongjit, Member, IEEE, 2016.
- [6] Transmission Line Conductor Temperature Impact on State Estimation Accuracy. Marija Bočkarjova, Student Member, IEEE, Göran Andersson, Fellow, IEEE, 2007.
- [7] Power System State Estimation Accuracy Enhancement using Temperature Measurements of Overhead Line Conductors. Michał Wydra, Piotr Kacejko, Lublin University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Metrol. Meas. Syst., Vol. 23, 2016.

* Los artículos [5], [6] y [7] sirvieron para documentarse acerca del tema de este Trabajo de Fin de Máster.